

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Departamento de Ingeniería Eléctrica

PROYECTO FIN DE CARRERA

*Estudio de optimización de un
engranaje magnético*

AUTOR: Juan Carlos Martín Martínez

DIRECTOR: Javier José María Rivas Conde

Leganés, 14 de Mayo de 2010



Agradecimientos

Querría agradecer al grupo de investigación El PEATEM la oportunidad de poder colaborar con ellos y haberse preocupado por ayudarme con mi proyecto en lo máximo posible. En especial, a mi tutor del proyecto, el Dr. Javier Rivas, por dirigir y dedicarme su escaso tiempo a esta labor.

A mis padres y mis hermanas se lo agradezco todo. En especial a mis padres por darme la oportunidad de estudiar dos carreras. Por animarme y hacerme ver el lado positivo de las cosas.

A Elena, por ser mi apoyo fundamental en la realización de este proyecto y haberme animado cuando las cosas se complicaban. Este proyecto es tuyo también. Te quiero.



Contenido

Capítulo 1	15
Introducción	15
Capítulo 2	17
Teoría de Elementos Finitos	17
2.1. Introducción	17
2.2. Técnicas de análisis	19
2.3. Formulación del sistema de ecuaciones	21
2.4. Introducción al software de CEDRAT	22
2.5. Conclusiones	24
Capítulo 3	25
3.1. Antecedentes Históricos	25
3.2. Curva de desmagnetización y parámetros magnéticos	26
3.3. Propiedades de los imanes permanentes.	31
3.3.1. Alnico.	32
3.3.2. Ferritas.	32
3.3.3. Imanes Permanentes de Tierras Raras.	33



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Capítulo 4	35
Modelo presentado	35
4.1. Introducción.	35
4.2. Consideraciones acerca de los materiales empleados en la simulación.	40
 Capítulo 5	 45
5.1. Introducción	45
5.2. Búsqueda de la posición relativa de la segunda rueda.	51
5.2.1. Evaluación del modelo	51
5.2.2. Simulaciones realizadas	51
5.2.3. Conclusiones	54
5.3. Fuerzas producidas por la repulsión de 2 imanes libres de NdFeB enfrentados entre sí.	55
5.3.1. Evaluación del modelo	55
5.3.2. Simulaciones realizadas	56
5.3.2.1. Orientación axial del campo.	56
5.3.2.2-. Orientación radial del campo	57
5.4. Análisis del modelo con imanes de orientación radial del campo magnético.	59
5.4.1. Evaluación del modelo	59
5.4.2. Simulaciones realizadas	60
5.4.3 Conclusiones.	63
5.5. Estudio de la influencia del ángulo de inclinación del campo magnético	64
5.5.1. Evaluación del modelo	64



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.5.2. Simulaciones realizadas	65
5.5.2.1. Simulación para $\alpha=0$ grados	65
5.5.2.1. Simulación para $\alpha=10$ grados	66
5.5.3. Conclusiones	67
5.6. Modelo de dos ruedas con $\alpha=10$ grados	68
5.6.1. Evaluación del modelo	68
5.6.2. Simulaciones realizadas	69
5.6.2.1 Simulación para $\beta=0$	69
5.6.2.2. Simulación para $\beta=-15$	71
5.6.3. Conclusiones	71
5.7. Modelo de 3 ruedas	72
5.7.1- Evaluación del modelo	72
5.7.2. Simulación del modelo para diferentes ángulos.	74
5.7.2.1. Simulación para $\beta=0$	74
5.7.2.2. Simulación del modelo para un ángulo $\beta=-15^\circ$	78
5.8. Modelo de 2 ejes con 3 ruedas por eje	81
5.8.1. Evaluación del modelo	81
5.8.2. Simulaciones realizadas:	82
5.8.2.1. Modelo con $\alpha=0$ y $\beta=0$	82
5.8.2.2. Modelo con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados	85
5.8.3. Conclusiones	88
5.9. Estudio de ruedas simples de 3, 4 y 5 imanes por soporte	89
5.9.1. Evaluación del modelo	89



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.9.2. Simulaciones realizadas	89
5.9.2.1. Modelo 3 Imanes por soporte	89
5.9.2.2. Modelo 4 Imanes por soporte	91
5.9.2.3. Modelo 5 Imanes por soporte	92
 Capítulo 6	 95
Conclusiones y líneas futuras	95
6.1. Conclusiones	95
6.2. Líneas Futuras	97
 Capítulo 7	 99
Bibliografía	99
 Capítulo 8	 I
Anexos	I
8.1. Tablas obtenidas de las simulaciones	III
8.1.1. Datos del modelo propuesto inicialmente	III
8.1.2. Datos obtenidos de la variación de la rueda_2 respecto a la rueda_1 a través del parámetro “alpha”	VI
8.1.3. Datos obtenidos del estudio de la distancia sobre dos bloques de imanes	XXXII
8.1.5. Estudio del ángulo beta óptimo con ANGLE y alpha constante	XXXVI
8.1.6. Modelo de dos ruedas con alpha=10	XL
8.1.7. Modelo de 3 ruedas	XLIV



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.8 Simulación de modelos de 2 ejes con 3 ruedas decaladas 30 grados	L
8.1.9. Datos obtenidos de la simulación de modelos con diferentes números de imanes por rueda	LV
8.2. Planos	LXIII
8.2.1. Plano del imán de NdFeB de 80x20 mm.	LXIII
8.2.2. Plano del eje de 2 ruedas	LXIII
8.2.3. Plano del eje de 3 ruedas	LXIII
8.3.4. Soporte de 3 imanes	LXIII
8.3.5. Soporte de 4 imanes	LXIII
8.2.6. Soporte de 5 imanes	LXIII
8.2.7. Soporte para imanes NdFeB	LXIII



Índice de figuras

Figura 2.1: Proceso de diseño de un modelo con elementos finitos	20
Figura 3.1: Curva de magnetización intrínseca	27
Figura 3.2: Ciclo de histéresis	28
Figura 3.3: Distribución de la fuerza magnetomotriz y flujo magnético a través de la altura h_m de un imán rectangular.....	29
Figura 3.4: Gráfica comparativa entre Alnico, ferritas y NdFeB.....	30
Figura 4.1: Prototipo prestado como modelo del proyecto.....	35
Figura 4.2: Detalle del motor junto con sus poleas.....	37
Figura 4.3: Detalle de rueda con tipo de sujeción de los imanes.....	37
Figura 4.5: Vista real del prototipo.....	37
Figura 4.4: Modelo simplificado diseñado por Flux	37
Figura 4.6: Diferentes vistas del modelo diseñado (vista en planta, alzado y caballera)	38
Figura 4.7: Gráfica del par mecánico del modelo inicial	39
Figura 4.8: Modelo en forma de X.....	42
Figura 4.9: Modelo imitando una rueda.....	42
Figura 5.1: Ubicación de los sistemas de coordenadas locales alineados con el sistema de coordenadas global	47
Figura 5.2: Posición inicial antes de comenzar cualquier simulación ($ANGLE=-45$) y sentido de giro durante la simulación	48
Figura 5.3: Desfase entre rueda_2 y rueda_1	48
Figura 5.4: Orientación axial del campo para $ANGLE=0$ y $ANGLE=45$	49
Figura 5.5: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=0^\circ$	53
Figura 5.6: Líneas de campo sobre un cilindro con orientación de campo longitudinal	56
Figura 5.7: Distribución de fuerzas respecto a la distancia de separación entre imanes	57
Figura 5.8: Líneas de campo en el imán	58



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Figura 5.9: Interacción del campo	58
Figura 5.10: Representación gráfica de la fuerza vs. distancia entre imanes	58
Figura 5.11: Modelo simplificado de dos aspas con una configuración de campo radial.	60
Figura 5.12: Gráfica del par mecánico por rueda para el modelo de dos ruedas con $\alpha=0$ y $\beta=0$	61
Figura 5.13: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=0$ y $\beta=0$	62
Figura 5.14: Gráfica comparativa entre orientación radial y axial	63
Figura 5.15: Ángulo β de orientación del campo radial con $\alpha=0$	64
Figura 5.16: Gráfica del par mecánico en función de beta con $\alpha=0$ y $\text{angle}=0$	65
Figura 5.17: Par mecánico en función de beta con $\alpha=10$ y $\text{angle}=0$	66
Figura 5.18: Modelo de dos ruedas con su ángulo $\alpha=10$ grados	68
Figura 5.19: Gráfica de par mecánico en cada eje para el modelo de dos ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=0$ grados	70
Figura 5.20: Gráfica de par mecánico en cada eje para el modelo de dos ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados	71
Figura 5.21: Detalle de los ángulos de inclinación respecto al eje global situado sobre rueda 1	73
Figura 5.22: Gráfica del par magnético para cada eje por separado	75
Figura 5.23: Detalle de efecto de repulsión para $\text{ANGLE}=-20$	76
Figura 5.24: Detalle de efecto de repulsión para $\text{ANGLE}=10$	76
Figura 5.25: Gráfica del par magnético neto total para el modelo de 3 ruedas con $\beta=0$	77
Figura 5.26: Detalle sobre la orientación $\beta=-15$ grados	78
Figura 5.27: Gráfica del par mecánico en el eje de cada rueda para una orientación del campo de $\beta=-15$ grados	79
Figura 5.28: Gráfica del Par magnético neto total para el modelo de 3 ruedas con $\beta=-15$	80
Figura 5.29: Modelo de 6 ruedas distribuidas en dos ejes alineados	82



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Figura 5.30: Gráfica del par mecánico de cada eje en el modelo de 3 ruedas por eje con $\beta=0$	83
Figura 5.31: Gráfica del Par magnético neto total para el modelo de 3 ruedas por eje $\beta=0$	84
Figura 5.32: Modelo de 3 ruedas por eje decaladas 30 grados y teniendo el segundo eje un adelanto de 10 grados.....	85
Figura 5.33: Gráfica del par mecánico de cada eje en el modelo de 3 ruedas por eje con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados	86
Figura 5.34: Gráfica del par magnético neto total para el modelo de 9 ruedas con el eje_2 adelantado 10 grados y $\beta=-1$	87
Figura 5.36 Gráfica del par mecánico para cada rueda de 3 imanes	90
Figura 5.35: Modelo simplificado de 3 imanes por eje (instante Angle=0)	90
Figura 5.37: Modelo de 4 imanes por eje (instante Angle=0)	91
Figura 5.38 Gráfica del par mecánico para cada rueda de 4 imanes	91
Figura 5.40 Gráfica del par mecánico para cada rueda de 5 imanes	93
Figura 5.39: Modelo de 5 imanes por eje (instante Angle=0).....	93
Figura 8.1: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=10$ grados.....	XI
Figura 8.2: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=20$ grados.....	XV
Figura 8.3: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=30$ grados.....	XIX
Figura 8.4: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=40$ grados.....	XXIII
Figura 8.5: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=45$ grados.....	XXVII
Figura 8.6: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2- RUEDA_1 con $\alpha=50$ grados.....	XXXI



Índice de tablas

Tabla 2.1: Tipos de problemas resueltos por Flux 10.3 de Cedrat©	23
Tabla 4.1: Tabla de imanes permanentes NdFeB	41
Tabla 5.1: Definición del ángulo de rotación para cada sistema de coordenadas local	46
Tabla 5.2-. Ángulo α para cada simulación realizada	52
Tabla 5.3-. Orientación del campo en el software Flux.....	60
Tabla 5.4: Relación del ángulo α para el modelo de 2 ruedas.	69
Tabla 5.5-. Relación del ángulo α en función de la rueda	72
Tabla 5.6-. Definición del ángulo β	73
Tabla 8.1: Valores obtenidos del modelo inicial	V
Tabla 8.2: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=0$ grados	VIII
Tabla 8.3: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=10$ grados	X
Tabla 8.4: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=20$ grados	XIV
Tabla 8.5: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=30$ grados	XVIII
Tabla 8.6: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=40$ grados	XXII
Tabla 8.7: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=45$ grados	XXVI
Tabla 8.8: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=50$ grados	XXX
Tabla 8.9: Datos de fuerza para imanes con orientación axial y radial.....	XXXII
Tabla 8.10: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=0$ y $\beta=0$	XXXV
Tabla 8.11: Datos de par mecánico para $\alpha=0$ y $\text{angle}=0$	XXXVII
Tabla 8.12: Datos de par mecánico para $\alpha=10$ y $\text{angle}=0$	XXXIX
Tabla 8.13: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=0$ grados	XLII
Tabla 8.14: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados .	XLIV
Tabla 8.15: Datos del modelo de 3 ruedas con $\beta=0$ grados y $\alpha=10$ grados...	XLVII
Tabla 8.16: Datos del modelo de 3 ruedas con $\beta=-15$ grados y $\alpha=10$ grados .	XLIX
Tabla 8.17: Datos del modelo de 2 ejes con 3 ruedas decaladas 30 grados con $\alpha=0$ grados y $\beta=0$ grados	LII



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Tabla 8.18: Datos del modelo de 2 ejes con 3 ruedas decaladas 30 grados con $\alpha=10$ grados y β grados	LIV
Tabla 8.19: Datos del modelo de 2 ruedas de 3 imanes por rueda	LVIII
Tabla 8.20: Datos del modelo de 2 ruedas de 4 imanes por rueda	LX
Tabla 8.21: Datos del modelo de 2 ruedas de 5 imanes por rueda	LXII



Capítulo 1

Introducción

El proyecto surge de una consulta técnica al Departamento de Ingeniería Eléctrica, acerca de la viabilidad de una patente para la obtención de energía eléctrica mediante un generador eléctrico, a partir de la repulsión magnética que presentan los imanes permanentes de la misma polaridad.

El modelo está basado en la transferencia de energía que se produce en el movimiento giratorio de un par de ruedas, dispuestas en ambos ejes. En la periferia de dichas ruedas se han dispuesto, unos imanes sin contacto entre sí, para que a través de la repulsión del campo magnético percibido por los mismos tienda a hacer girar la correspondiente rueda.

El objetivo del proyecto es el análisis en elementos finitos del prototipo patentado y la posibilidad de optimizarlo para mejorar el rendimiento energético. Se trata de estudiar el modelo y obtener conclusiones acerca del funcionamiento industrial, puesto que podría plantearse obtener una ampliación de la patente del modelo.

Para ello se realizarán simulaciones en software de elementos finitos, para verificar la correcta viabilidad del modelo y poder conocer la rentabilidad energética del prototipo y en qué condiciones ha de hacerse funcionar.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Además, se es consciente que la realización de mediciones de par en el eje requeriría utilizar galgas extensiométricos adecuadas, dispositivos de los que no se disponen en el laboratorio. Por tanto, las técnicas de elementos finitos, se adecuan al alcance del estudio requerido, donde se puede realizar un modelo complejo, tanto en 2D como en 3D, con los que se pueden simular prácticamente las mismas condiciones sin emplear ningún prototipo real, con el coste asociado a la construcción del dispositivo. En un modelo simulado se pueden cambiar las características de los dispositivos con un ahorro muy significativo.

En función de los resultados obtenidos del modelo presentado se idearán nuevas soluciones con la finalidad de optimizar el rendimiento y mejorar la transferencia de par en el eje para obtener energía del modelo.

La organización del proyecto quedará establecida de la siguiente manera:

- I. En primer lugar se hablará de los conceptos básicos del software de elementos finitos. Se hará una breve descripción de las tareas que éstos permiten acometer y se especificará las características del software elegido para el desarrollo del modelo.
- II. Se dará una noción sobre los antecedentes históricos de los imanes permanentes y se definirán sus parámetros físicos y sus ecuaciones fundamentales.
- III. Se hablará del modelo real analizado, a partir del cual se analizarán posibles mejoras alternativas al modelo presentado.
- IV. Posteriormente se comentarán, una a una, dichas modificaciones empleados en el transcurso del proyecto, y a su vez se explicarán los resultados obtenidos con cada una de ellas.
- V. Análisis de los resultados y síntesis del proyecto valorando la posibilidad de su validación para una patente industrial



Capítulo 2

Teoría de Elementos Finitos

2.1. Introducción

En la actualidad existen gran cantidad de problemas de ingeniería que requieren la aplicación del cálculo numérico avanzado para la solución de problemas complejos. Estas técnicas se han aplicado tradicionalmente para la resolución de problemas térmicos y mecánicos, principalmente. Actualmente, empiezan a desarrollarse software que permite calcular problemas magnéticos y electromagnéticos, que será el ámbito que nos ocupe.

Las técnicas de elementos finitos permiten reducir los costes de ensayos y son fundamentales en los desarrollos de nuevas piezas y modelos en multitud de estudios. A partir de un software, es posible realizar todo tipo de ensayos (mecánicos, térmicos, electromagnéticos,...) e incluso se pueden combinar entre sí, o se pueden exportar los modelos de un software a otro.

Todos los grandes proyectos que traten de la construcción de nuevos dispositivos, son desarrollados previamente mediante estos métodos mediante los cuales se obtienen resultados fiables. Actualmente, estos métodos son la base de cálculo para el comportamiento de cada uno de los conjuntos de componentes de un prototipo; estos modelos permiten obtener hasta la geometría de cada una de los



Estudio de optimización de un engranaje magnético

elementos de las que está compuesto el modelo. La complejidad matemática del modelo la determina el diseñador en función de la cantidad de nodos y líneas con que diseñe el modelo y en función de lo fino que realice el mallado, ya que a mayor cantidad de elementos, mayor será el requerimiento de potencia de cálculo, por tener mayor número de ecuaciones que resolver, pero por lo general se obtendrá mayor precisión. Para llegar a una fórmula de compromiso se afina el mallado en aquellas zonas que van a ser objeto de estudio, como pueden ser los entrehierros de una máquina.

En ingeniería eléctrica, estos métodos pueden ser aplicados a máquinas en general como transformadores, motores, líneas de transmisión y otros componentes magnéticos con el fin de determinar distribuciones de campos magnéticos en puntos o zonas determinadas, para poder calcular magnitudes interesantes como la fuerza, la inductancia de una bobina, etc.

La técnica de análisis por elementos finitos consiste en dividir el espacio en el que se quiere estudiar una ecuación diferencial de un campo escalar o vectorial en un dominios, pequeños elementos o partes más elementales, teniendo en cuenta unas ecuaciones de campo en cada elemento, los elementos del entorno y las fuentes generadoras de campo en cada elemento.

Esta técnica es muy utilizada en el ámbito de la ingeniería debido a que muchos problemas físicos de interés se formulan mediante la resolución de una ecuación diferencial en derivadas parciales, a partir de cuya solución es posible modelar dicho problema: transmisión de calor, electromagnetismo, cálculo de estructuras, etc. Se facilita así la solución de dichos problemas, ya que dichas soluciones son el punto de partida para el diseño y modelado de los sistemas físicos que representan aquellas ecuaciones.

La aplicación de las técnicas analíticas a la resolución de problemas puede adolecer de los siguientes problemas entre otros:

- Falta de fidelidad del modelo, debido a que la distribución de campo empieza a dejar de ser unidimensional



Estudio de optimización de un engranaje magnético

- Imposibilidad de aplicación, debido a la complejidad del mismo campo.

En todos estos casos en los que las técnicas analíticas presentan estos inconvenientes, es donde los métodos numéricos iterativos obtienen su mayor ventaja de utilización. La manera de actuar éstos es mediante la transformación de la ecuación diferencial en una ecuación en diferencias, resolviéndola de forma iterativa permitiendo así modelar sistemas similares a los reales y obtener la solución al problema planteado, con bastante aproximación.

Este método fue propuesto por primera vez en la década de los cuarenta y fue empleado para el diseño de aeronaves. De ahí en adelante ha sido ampliamente usado en problemas de análisis estructural en donde se requiere identificar y analizar puntos en los materiales donde los esfuerzos pueden ser peligrosos sin necesidad de realizar pruebas destructivas.

2.2. Técnicas de análisis

La técnica de análisis por elementos finitos consiste en el empleo de los métodos numéricos en la resolución de un problema físico determinado discretizado.

La resolución de estas ecuaciones se efectúa de forma iterativa hasta que se alcanza la convergencia en la solución.

Existen herramientas de elementos finitos de propósito general o multidisciplinar que permiten resolver varios problemas físicos, que pueden estar interrelacionados entre sí, como son: mecánica de fluidos, transmisión de calor, electromagnetismo, mecánica estructural, etc. y que se aplican a un problema físico específico. Existen herramientas que permiten incluso acoplar dos problemas como es el caso del problema térmico y del problema electromagnético.

El proceso de generación de la solución mediante el análisis de elementos finitos se realiza en estas herramientas mediante el uso de varios pasos:



Estudio de optimización de un engranaje magnético

- Definición de la geometría objeto de estudio
- Asignación del tipo de estudio (Estacionario, Transitorio, Térmico...)
- Asignación de las propiedades físicas de los materiales
- Asignación de las condiciones de contorno
- Mallado de la geometría
- Resolución del problema
- Análisis de la solución

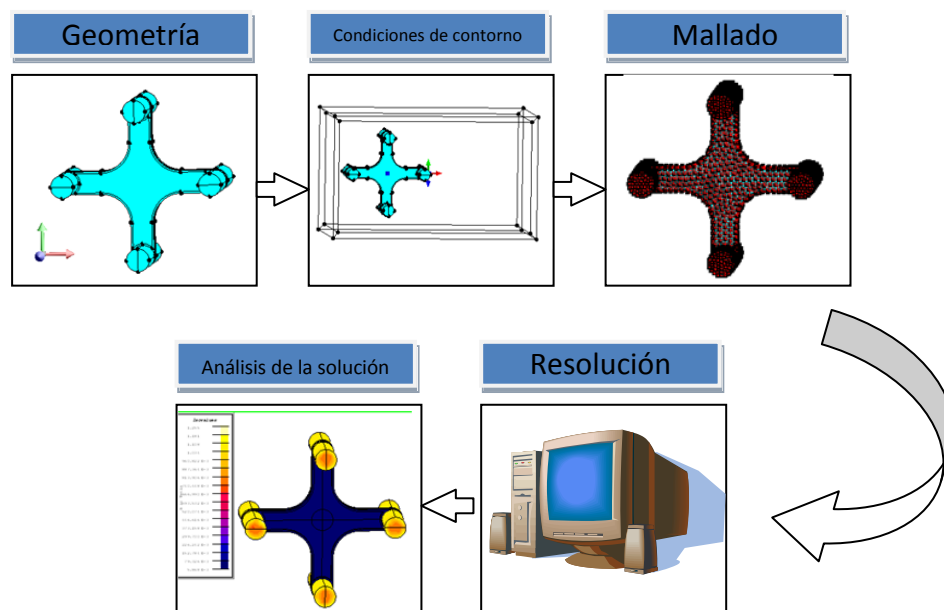


Figura 2.1: Proceso de diseño de un modelo con elementos finitos

Cada una de las partes, en las que se divide el cuerpo se denomina “elemento finito” o subdominio. Sobre éstos, se aplican las ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema:



Estudio de optimización de un engranaje magnético

- Cada subdominio está compuesto por nodos que pueden pertenecer a áreas adyacentes y que compartirán propiedades físicas.
- Al conjunto de todos los nodos y elementos se denomina mallado. La generación de este mallado es en realidad un procedimiento matemático.

En función de las magnitudes que se quieran estudiar se establecerán las relaciones pertinentes entre las diferentes áreas y volúmenes, dependiendo del campo de la física que se estudie. Estas relaciones vendrán establecidas mediante un sistema de ecuaciones lineales, que se denomina matriz de rigidez del sistema. La complejidad del sistema dependerá del número de nodos del modelo.

Las principales ventajas que presentan los métodos de elementos finitos son:

- Puede aplicarse a cuerpos compuestos por varios materiales.
- El tamaño de los elementos puede variar.
- El método emplea una formulación integral para generar un sistema de ecuaciones algebraicas.

2.3. Formulación del sistema de ecuaciones

En el caso que nos ocupa, el campo magnético al estar distribuido por todo el espacio incluso en el aire, se precisa tener en cuenta cuáles han de ser los valores en los extremos que se han imponer al problema, denominado condiciones de contorno. Esta es una cualidad propia del electromagnetismo a diferencia de los sistemas mecánicos en que no hace falta mallar el aire.



2.4. Introducción al software de CEDRAT

Los sistemas de elementos finitos han demostrado ser flexibles, fiables y eficaces en el análisis y síntesis de dispositivos electromagnéticos y electromecánicos. Los software más modernos, permiten la utilización de estos programas por personas no especializadas, simplemente con conocimientos de álgebra, cálculo y física. Aunque esto es cierto, la interpretación precisa de los resultados obtenidos requiere de alguna persona perita en el campo de la física que se esté aplicando.

Para el desarrollo del proyecto se ha utilizado el programa FLUX 10.3®, software de la compañía Cedrat.

Flux es un software de aplicación de elementos finitos utilizado para la simulación de problemas electromagnéticos y térmicos. Permite la simulación en 2D y en 3D. Flux es idóneo para el análisis:

- Estático
- Transitorio
- Armónico

El software de Flux está especialmente indicado para resolver problemas de tipo:

- Maquinas rotativas
- Actuadores lineales
- Electromagnéticos
- Transformadores
- Calentamiento por inducción
- Sensores
- Cables



Estudio de optimización de un engranaje magnético

El software de Flux es capaz de resolver todos los estudios relativos a:

	Demo version		Full version	
	2D	3D	2D	3D
Magnetic applications				
- static	x		x	x
- steady AC			x	x
- transient			x	x
- coupling with circuit equations			x	x
- movement (rotation & translation)			x	x
Electric applications				
- static	x		x	x
- steady AC			x	x
- electric conduction			x	x
Thermal applications				
- steady thermal	x		x	x
- transient thermal			x	x
- magneto thermal			x	x
- electro thermal			x	x
Other features				
- Coupling with Simulink			x	
- Multiphysics				x
- Motor Overlays (BPM, IM, DCM, SRM)	1		x	
- Advanced CAD Import / Export			x	x
- Superconductivity			x	

Tabla 2.1: Tipos de problemas resueltos por Flux 10.3 de Cedrat©

Para el estudio que se aborda como objeto en este proyecto se utilizarán estudios en estático y en movimiento (rotación). No es objeto del estudio el análisis del efecto de la temperatura sobre el modelo ni aspectos eléctricos puesto que no se disponen en la actualidad dichos módulos en nuestra aplicación.



2.5. Conclusiones

La técnica de análisis por elementos finitos se presenta como una técnica muy interesante, utilizada para resolver problemas complejos en ingeniería. Como aspectos interesantes de la aplicación de esta técnica destacan los siguientes:

- La resolución puede ser automatizada con ayuda de un programa por computador, como es el caso de las herramientas de elementos finitos
- La tarea de visualización de distribuciones de campo se efectúa de forma cómoda
- Una vez obtenida la solución a un problema, realizar operaciones matemáticas con la solución (post-procesamiento) se realiza con facilidad.



Capítulo 3

Caracterización de los imanes permanentes

3.1. Antecedentes Históricos

La primera vez que se menciona la existencia de un imán permanente data del año 600 A.C por el filósofo Thales de Mileto. Se trataba de un mineral magnético natural, en forma de magnetita Fe_3O_4 . Se le dio el nombre de Magnes, por encontrarse cerca de la región de Magnesia de Tesalia (Grecia). Los griegos conocían que ciertas piedras atraían el hierro y que los trocitos de hierro atraídos, atraían a su vez a otros.

Los primeros imanes artificiales fueron agujas de hierro imantadas por contacto con un imán permanente. El primer uso práctico del hombre pudo haber sido para la brújula. Fue inventada en China, aproximadamente en el siglo IX e inicialmente consistía en una aguja imantada flotando en una vasija llena de agua. Más adelante fue mejorada para reducir su tamaño e incrementar su practicidad, cambiándose la vasija de agua por un eje rotatorio.

Los primeros estudios de imanes fueron realizados por W. Gilbert, en 1600. Gilbert analizó que en un punto de la esfera había un máximo de atracción de un extremo de la aguja y sin embargo, en el punto opuesto existía un máximo de atracción del otro extremo. En los distintos puntos de la superficie de la esfera, la aguja



Estudio de optimización de un engranaje magnético

siempre se orientaba en una posición definida a lo largo de un círculo máximo que enlazaba las puntas de atracción máxima o polos magnéticos de la esfera.

En 1867, la literatura alemana mostraba la posibilidad de realizar aleaciones magnéticas a partir de materiales ferromagnéticos y materiales no ferromagnéticos. Una aleación típica en 1901, la aleación de *Heusler*, que contenía entre un 10 a 30% de manganeso y un 15 a 19% de aluminio.

En 1917, se descubre en Japón, las aleaciones de acero y cobalto y en 1931 *Alnico* (Al, Ni, Co, Fe). En 1938, se desarrollan los imanes de óxidos de polvo. A partir de aquí se desarrolla toda la tecnología de la ferrita moderna.

3.2. Curva de desmagnetización y parámetros magnéticos

Un imán permanente puede producir un campo magnético sin la necesidad de excitación ni disipación de energía eléctrica. La energía externa sólo se utiliza para modificar la dirección del campo y no para mantenerla.

Los materiales ferromagnéticos son descritos por su curva de histéresis B-H, pero para el caso concreto de un imán permanente se utiliza la parte de su ciclo de histéresis situado en el cuadrante superior izquierdo, segundo cuadrante, llamado curva de desmagnetización.

Los imanes permanentes son caracterizados por los siguientes parámetros:

1. **La inducción magnética saturada (B_{sat}) y la de intensidad del campo magnético para la saturación (H_{sat}).** En este punto la alineación de todos los momentos magnéticos de los dominios se encuentra en la dirección del campo magnético externo aplicado.
2. **Inducción magnética remanente (B_r),** es la inducción magnética correspondiente a la intensidad de campo magnético nula. Una alta inducción significa que el imán puede producir inducciones magnéticas elevadas en el entrehierro del circuito magnético.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

3. **Fuerza coercitiva¹ del campo (H_c)**, es el valor necesario de la intensidad del campo magnético para conseguir una inducción magnética nula en un material previamente magnetizado.
4. **Curva de desmagnetización intrínseca**, corresponde al segundo cuadrante del ciclo de histéresis, donde $B_i = B - \mu_0 H$.

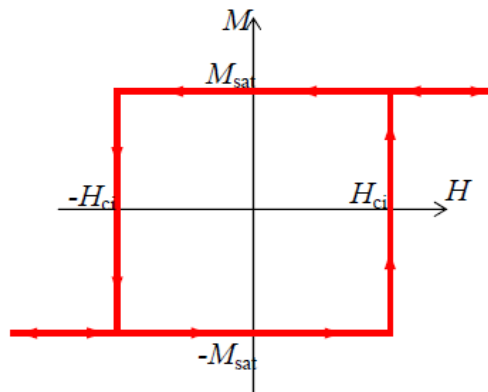


Figura 3.1: Curva de magnetización intrínseca

5. **Coercitividad**, es la intensidad del campo magnético necesario para hacer cero la inducción magnética de un material descrito por su curva $B_i = f(H)$. Una alta coercitividad indica mayor dificultad para desmagnetizar el material por acciones mecánicas o por cambios de temperatura.
6. **Permeabilidad magnética**, es el coeficiente entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético en cualquier punto de la curva de desmagnetización

$$\mu_{rec} = \mu_0 \mu_{rrec} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1)$$

donde $\mu_{rrec} = 1 \dots 3,5$ y es la permeabilidad relativa.

7. **Factor de forma de la curva de desmagnetización**, caracterizada por la concavidad de su curva de desmagnetización.

¹ **fuerza coercitiva** Intensidad de campo magnético necesaria para suprimir la imanación que se ha producido en un material ferromagnético después de haber estado sometido a la acción de un campo magnético.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

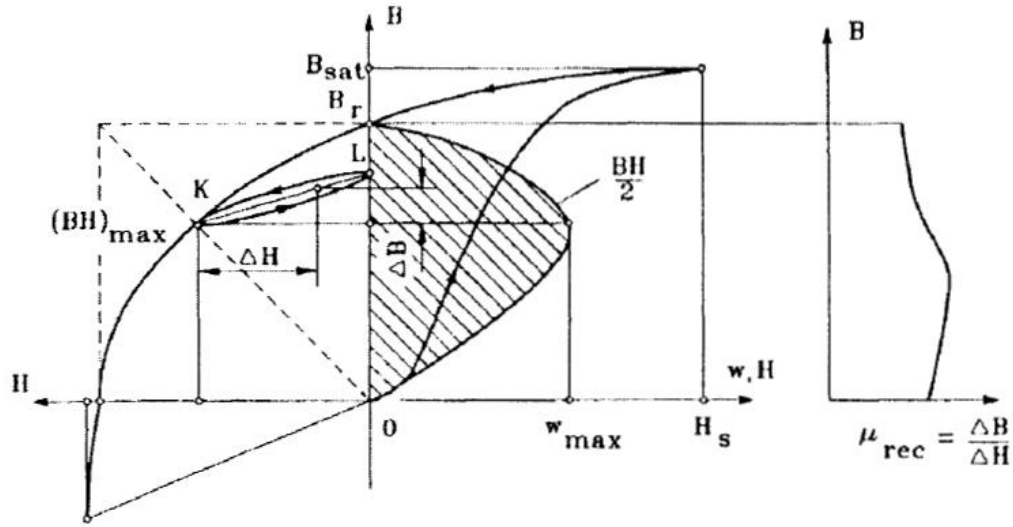


Figura 3.2: Ciclo de histéresis

La relación entre la inducción magnética B , la magnetización intrínseca B_i presente en materiales ferromagnéticos y la intensidad del campo magnético H puede ser expresado como

$$B = \mu_0 H + B_i = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_r H \quad (2)$$

En donde, \vec{B} , \vec{H} , \vec{B}_i y $\vec{M} = \vec{B}_i / \mu_0$ son vectores paralelos o antiparalelos, de modo que la ecuación 2 se puede simplificar de forma escalar. Se define la permeabilidad magnética en el espacio como: $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6} \text{ H/m}$, y la permeabilidad magnética relativa es: $\mu_r = 1 + \chi \gg 1$.

Debido a los flujos de dispersión, los imanes permanentes poseen comportamientos no uniformes para todo el volumen.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

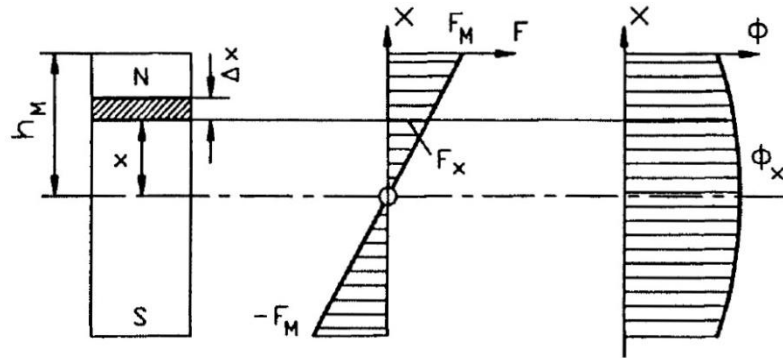


Figura 3.3: Distribución de la fuerza magnetomotriz y flujo magnético a través de la altura h_M de un imán rectangular

El flujo de dispersión causado por la inducción magnética es no uniforme a lo largo de la altura $2h_M$ del imán permanente. Como resultado, la fuerza magnetomotriz (MMF) producida por los imanes permanentes no es constante. El flujo magnético es mayor en la sección central y menor en los extremos, pero el comportamiento de la fuerza magnetomotriz es la contraria.

Las superficies de los imanes permanentes no son equipotenciales. El potencial magnético en cada punto de la superficie es una función dependiente de la distancia a la zona intermedia del imán. Para simplificar el cálculo del flujo magnético, que es una función de la distribución de la fuerza magnetomotriz a lo largo de la altura h_M por polo, se sustituye por un flujo equivalente. Para encontrar el flujo de dispersión equivalente y el flujo del imán permanente, la intensidad del campo magnético equivalente se encuentra

$$\mathbf{H} = \frac{1}{h_M} \int_0^{h_M} \mathbf{H}_x dx = \frac{F_M}{h_M} \quad (3)$$

Donde H_x es la intensidad del campo magnético a la distancia x desde la sección central y F_M es la fuerza magnetomotriz de los imanes permanentes por polo. (MMF=2 F_M por par de polos).

La media del flujo magnético equivalente y la fuerza magnetomotriz equivalente significa que la inducción magnética y la intensidad de campo magnético se supone que son constante para todo el volumen de imán permanente. La energía total producida por el imán en el espacio es



Estudio de optimización de un engranaje magnético

$$W = \frac{BH}{2} V_M [J] \quad (4)$$

donde V_M es el volumen de imán permanente o sistema de imanes permanentes.

Para imanes permanentes con una curva de desmagnetización lineal, como en el caso de los imanes de NdFeB, la intensidad de campo coercitivo a temperatura constante se puede representar como:

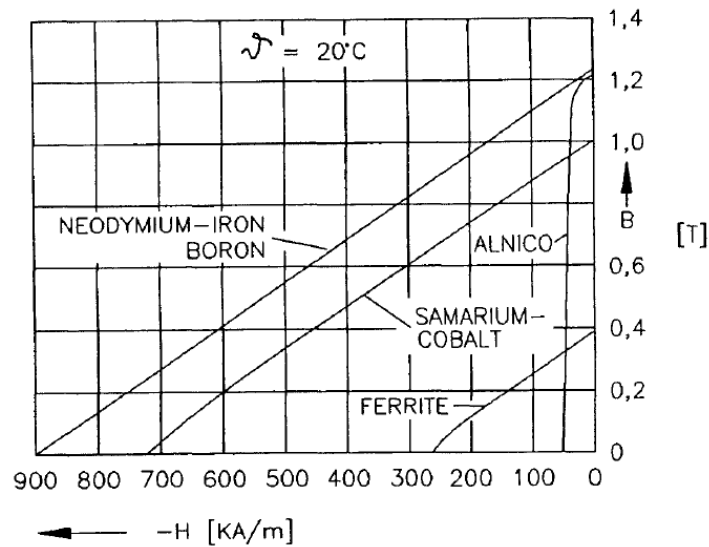


Figura 3.4: Gráfica comparativa entre Alnico, ferritas y NdFeB

Y puede calcularse como en función de B_r y μ_{rrec} como

$$H_c = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} \quad (5)$$

La inducción magnética producida en el entrehierro denominado g por un imán permanente con una curva de desmagnetización lineal y su altura h_m , que corresponde a la mitad de la distancia entre polos, situado en el circuito magnético con permeabilidad muy grande y entrehierro g , es aproximadamente

$$B_g \approx \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} g / h_m} \quad (6)$$

A esta ecuación podemos llegar a través de las analogías con las ecuaciones de kirchoff para circuitos magnéticos para la caída de fuerza magnetomotriz en el circuito magnético por polo:



Estudio de optimización de un engranaje magnético

$$4 \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} h_M = 4 \frac{B_{mg}}{\mu_0 \mu_{rrec}} + 4 \frac{B_{mg}}{\mu_0} g + \sum H_{Fei} l_{Fei} \quad (7)$$

Agrupando términos se obtiene

$$4 \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} h_M = 4 \frac{B_{mg}}{\mu_0} \left(\frac{h_M}{\mu_{rrec}} + g k_{sat} \right) \quad (8)$$

$$\text{Donde } K_{sat} = 1 + \frac{\sum_i H_{Fei} l_{Fei}}{4 B_{mg} g / \mu_0}$$

Modificando las ecuaciones se obtiene

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + (\mu_{rrec} g / h_M) K_{sat}} \quad (9)$$

Si estimamos que $K_{sat} \approx 1$ y así llegamos a la ecuación anterior (ecuación 9)

3.3. Propiedades de los imanes permanentes.

Hay tres tipos de imanes permanentes principalmente utilizados.

- **Alnicos** (Al, Ni, Co, Fe)
- **Cerámicos** (ferritas) por ejemplo, ferrita de bario ($\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) y ferrita de Estroncio ($\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)
- **Materiales tierras raras**, como por ejemplo, samario-cobalto (SmCo) y neodimio-hierro-Boro (NdFeB)

La curva de magnetización de estos materiales se ha mostrado en la Figura 3.4

Como se puede ver en la Figura 3.4, la utilización mayoritaria de los imanes permanente Neodimio-Hierro-Boro frente a otros como el Samario-Cobalto, o las ferritas se debe a las mejores prestaciones que aquéllos presentan. Dicho imán posee un mayor valor de inducción magnética (B), así como mayor valor de intensidad del campo magnético (H), lo que lo hace idóneo para multitud de aplicaciones, por presentar mayor energía del campo magnético.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Estas curvas son muy sensibles a la temperatura. Tanto la inducción como la intensidad del campo magnético decrecen cuando la temperatura del imán se incrementa, es decir,

$$B_r = B_{r20} \left[1 + \frac{\alpha_B}{10} (\nu_{PM} - 20) \right] \quad (10)$$

$$H_c = H_{c20} \left[1 + \frac{\alpha_H}{100} (\nu_{PM} - 20) \right] \quad (11)$$

Donde ν_{PM} es la temperatura de los imanes permanentes. B_{r20} y H_{c20} es la densidad de flujo remanente y la fuerza coercitiva para una temperatura de 20° C, y $\alpha_B < 0$ y $\alpha_H < 0$ son coeficientes de temperatura para B_r y H_c , respectivamente.

3.3.1. Alnico.

La principal ventaja de Alnico es su elevada densidad de flujo remanente y bajo coeficiente de temperatura. El coeficiente de temperatura B_r es -0.02%/°C y su temperatura máxima de servicio oscila en los 520°C. Esta ventaja permite una alta densidad de flujo magnético en el entrehierro con altas temperaturas de magnetización. Desafortunadamente, posee una fuerza coercitiva muy pequeña y la curva de desmagnetización es no lineal. Este material se utilizaba principalmente en motores de corriente continua.

3.3.2. Ferritas.

Fueron inventadas en la década de 1950. Posee más fuerza coercitiva que los Alnico, pero al mismo tiempo tienen menor inducción de flujo magnético remanente. La variación de los coeficientes dependientes de la temperatura es relativamente alto, $B_r = -0.20\%/^{\circ}\text{C}$ y $H_c = -0.27\%/^{\circ}\text{C}$. Su temperatura máxima de servicio se establece en 400°C.

Sus principales ventajas se fundamentan en un bajo coste y alta resistencia eléctrica, lo que significa que se reducen las pérdidas por corrientes parásitas.

La formulación química de las ferritas es $MOx6(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, donde M puede ser cualquiera de los siguientes elementos: Ba, Sr o Pb.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

3.3.3. Imanes Permanentes de Tierras Raras.

Durante las últimas tres décadas se ha producido un gran progreso en relación con la densidad de energía disponible $(BH)_{\max}$ de los PM de las tierras raras. Para producir un metal constituido por estos elementos, para los que no existen aplicaciones comerciales, han de ser refinados. Esto limita la disponibilidad de estos metales.

Las primeras generaciones de estas nuevas aleaciones fueron las basadas en la composición $SmCo_5$ que fueron inventadas en la década de 1960 y producidas comercialmente desde la década de 1970. Este compuesto es un material magnético duro. El $SmCo_5$ tiene la ventaja de alta densidad de flujo remanente, fuerza coercitiva alta, producto de alta energía, curva de desmagnetización lineal y bajo coeficiente de temperatura. El coeficiente de temperatura B_r es 0.03 a 0.045%/°C y el coeficiente H_c es 0.14 a 0.4%/°C. El punto de máximo funcionamiento está entre 300 y 350°C.

Con el descubrimiento de la segunda generación, en los últimos años, basado en el Neodimio (Nd), se ha producido un progreso notable con respecto a la reducción coste de la materia prima.

La existencia del Neodimio (Nd) es más abundante que el Samario (Sm). El imán de NdFeB, cada vez tiene mejores propiedades magnéticas en comparación con el $SmCo_5$, pero solamente a temperatura ambiente. La curva de desmagnetización, especialmente la fuerza coercitiva, posee una dependencia de la temperatura fuerte.

El imán de NdFeB es susceptible de corrosión, aunque se conoce que éstos poseen un gran potencial para mejorar considerablemente el rendimiento en función del coste para muchas aplicaciones. Por esta razón, estos imanes tendrán un importante impacto en el desarrollo y aplicación en aparatos que utilicen imanes permanentes en el futuro.

El método más económico para la producción en masa de simples piezas en forma de bloques, anillos o segmentos de arco en un tamaño hasta 100g es a partir de un proceso de prensado de polvos en la forma final.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Posteriormente, le sigue un tratamiento de sinterización, y tratamiento térmico que se realiza al vacío o en una atmósfera de gas inerte. Temperaturas de sinterización están en el rango de 1.000 a 1.200°C dependiendo del material durante 30 a 60 minutos. Después de este proceso de sinterización de la microestructura del material, éste está optimizado.

La utilización más importante de estos imanes, es fundamentalmente para máquinas eléctricas, puesto que el 40% de los imanes forman parte de ellas. Otro destino de utilización son actuadores en tecnologías de almacenamiento de datos, dispositivos acústicos y dispositivos magnetomecánicos. (ver bibliografía epígrafe 5)



Capítulo 4

Modelo presentado

4.1. Introducción.

Con el estudio del prototipo se trata de obtener una configuración óptima con la que se obtengan unos resultados que permitan al dispositivo funcionar en modo parecido a un generador, es decir, se pretende obtener energía eléctrica a través del movimiento mecánico. El modelo pretendía introducir una energía mecánica en el sistema y obtener una energía de salida. El encargo fue el estudio de esta transmisión magnética para tener el máximo rendimiento posible.

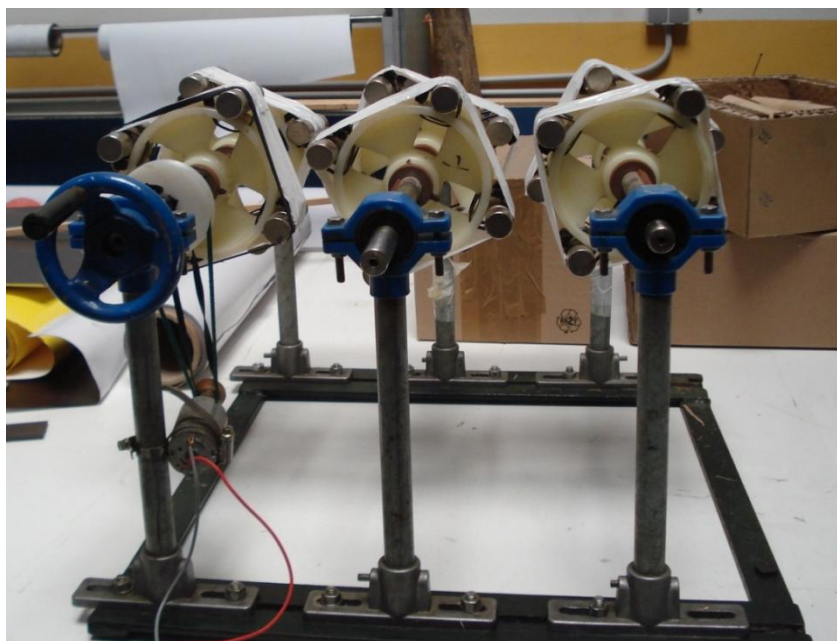


Figura 4.1: Prototipo prestado como modelo del proyecto



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Este modelo consta de una bancada metálica, que debe soportar todos los esfuerzos generados por la repulsión de los imanes, y 3 ejes con 2 ruedas por eje. Los respectivos ejes se encuentran colocados paralelamente y en posición horizontal, y sostenidos mediante rodamientos de bolas. Cada eje dispone de 2 ruedas. La disposición relativa de las ruedas en cada eje posee un decalaje de 45 grados para intentar garantizar el continuo movimiento del sistema. Cada rueda tiene acoplados en su periferia 4 imanes permanentes de NdFeB en forma de cilindros, con la orientación de magnetización axial y situados tangencialmente como se puede ver en la Figura 4.1. Las dimensiones del cilindro son: diámetro 20 mm. y longitud 80 mm. El diámetro de la rueda es de 75 mm. El dispositivo se puede accionar en forma manual mediante una manivela o con el motor, que dispone de poleas para asegurar el movimiento.

Para el correcto funcionamiento, los ejes contiguos han de estar separados por una distancia superior al diámetro de la rueda que porta a los imanes.

Los diferentes ejes se ubican paralelos a sí mismo, y portando ruedas que estarán colocadas de modo que se puedan agrupar una rueda de cada eje en un mismo plano perpendicular a los mismos. De tal modo que se tendrán tantas ruedas enfrentadas como ejes se dispongan. Algunas de ellas interactuará sólo por un lado (las ubicadas en los extremos) y otras lo harán por los dos lados (las de los ejes internos), esto si todos los ejes están dispuestos en un mismo plano horizontal.

Este modelo pretende utilizar la repulsión de los imanes para ir engranando los diferentes imanes y que las fuerzas generadas por su repulsión mejoren el funcionamiento del engranaje.

Ante la provisionalidad del modelo, se pueden observar que los sistemas empleados para la sujeción de los imanes son bridas, cinta adhesiva (ver Figura 4.3); con las poleas y motores empleados (ver Figura 4.2), es muy complicado obtener los pares generados en los ejes de modo fiable, y por tanto tomar la decisión de realizar un proyecto de manera industrial



Estudio de optimización de un engranaje magnético



Figura 4.2: Detalle del motor junto con sus poleas

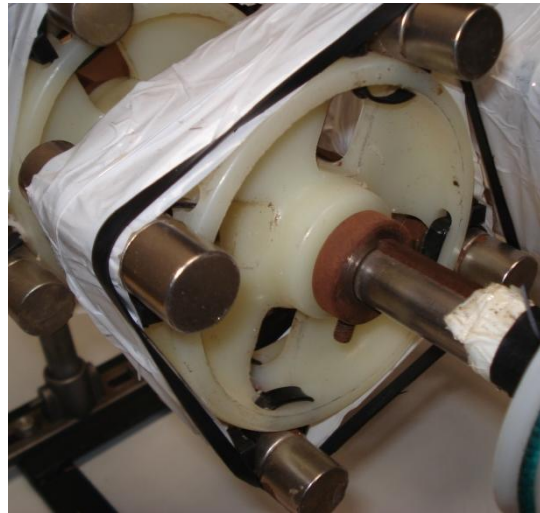


Figura 4.3: Detalle de rueda con tipo de sujeción de los imanes

Ante la imposibilidad de obtener resultados fidedignos, se decidió realizar el estudio con técnicas de elementos finitos en el que se trataría de asemejar el modelo real a un modelo teórico que mantuviese sus mismas propiedades.

Estos modelos teóricos sólo analizan los aspectos magnéticos, obviando todas las pérdidas mecánicas debidas a rozamientos de los cojinetes, a la fricción existente y al rozamiento con el aire. Las pérdidas por rozamiento y fricción son directamente proporcionales a la velocidad, mientras que las pérdidas por ventilación se consideran proporcionales a la 3ª potencia de la velocidad.

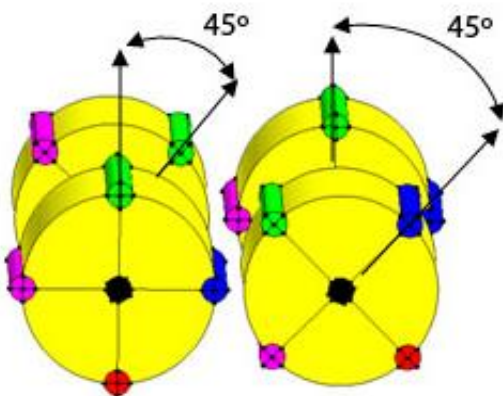


Figura 4.4: Modelo simplificado diseñado por Flux



Figura 4.5: Vista real del prototipo



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Los primeros modelos realizados han tratado de reflejar una similitud al modelo presentado para analizar los resultados que se podían obtener y cuáles eran las posibles mejoras que se podrían introducir para mejorar el resultado.

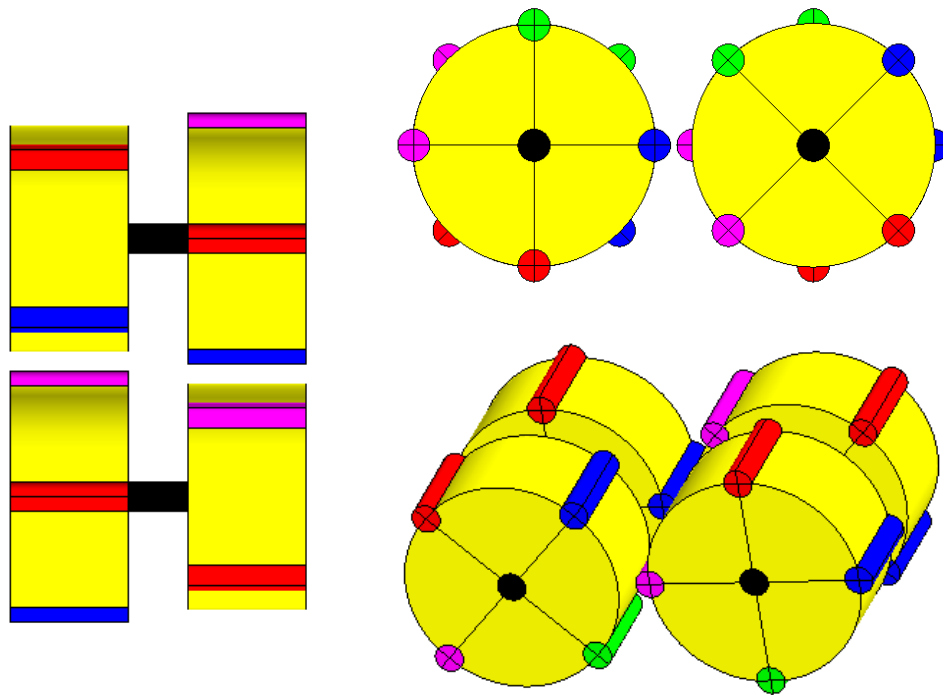


Figura 4.6: Diferentes vistas del modelo diseñado (vista en planta, alzado y caballera)

Con este modelo se pretende estudiar los siguientes aspectos fundamentales:

- Construcción de un modelo, en elementos finitos, que reproduzca lo más fielmente posible el sistema físico que se quiere estudiar.
- Estudio de la distancia óptima entre dos ruedas.

El modelo inicial consta inicialmente de dos ejes, con dos ruedas cada uno. En la Figura 4.6 se puede apreciar una vista en planta y un alzado así como una perspectiva caballera de las mismas. Se pueden apreciar las posiciones de los distintos bloques de imanes permanentes, cómo están contrapeados los correspondientes a dos ruedas del mismo eje, y cómo también están contrapeados también los bloques de imanes permanentes, correspondientes a ejes distintos entre dos ruedas enfrentadas.

Los imanes en cada rueda están decalados 90 grados entre sí. Las dos ruedas del mismo eje tienen un desfase de 45 grados en la colocación de los bloques.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

La orientación del campo magnético, es axial, es decir, perpendicular a la base del cilindro. Esta orientación coincide con la dirección geométrica Z del sistema de coordenadas cartesiano, para todos nuestros modelos que presenten esta orientación del campo.

A continuación se muestra el comportamiento del modelo en una simulación de 90 grados, donde se muestra el par mecánico neto² del conjunto. Dichos valores se pueden consultar en el anexo del documento (epígrafe 8.1.1 pág. III)

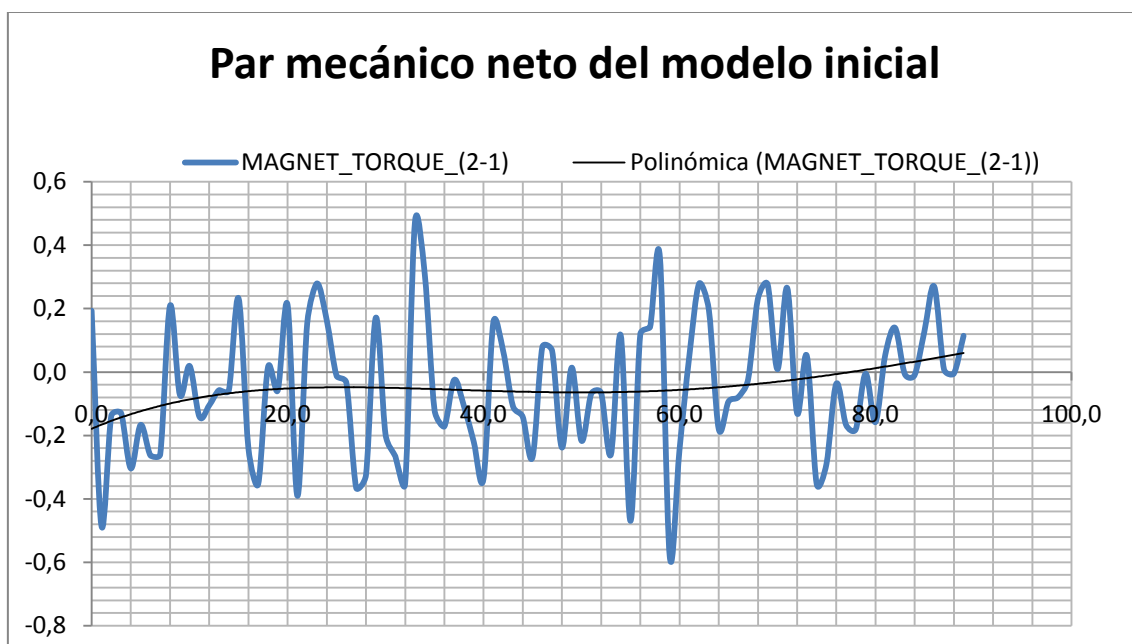


Figura 4.7: Gráfica del par mecánico del modelo inicial

Como se observa en la Figura 4.7 los resultados de la gráfica son insuficientes y mejorables puesto no muestran un posible funcionamiento óptimo, razón por la cual se desarrollará en el siguiente capítulo una serie de mejoras para mejorar el comportamiento del modelo, utilizando siempre una comparación directa con este modelo y resultados obtenido.

² **Par mecánico neto o MAGNET_TORQUE_(2-1)** Es la resta del par mecánico obtenido del eje_2 menos el par mecánico obtenido del eje_1. Se restan porque el par del eje_1 representa el esfuerzo motor realizado externamente para hacer girar el sistema.



4.2. Consideraciones acerca de los materiales empleados en la simulación.

Para el diseño del modelo existen básicamente tres materiales utilizados:

- Aire
- NdFeB30
- Aluminio

El **aire** es un material involucrado en todo el diseño puesto que rodea todos los volúmenes presentes del modelo y las líneas de campo estarán directamente relacionadas por este material que debe ser confinado en un volumen mayor junto con el prototipo para delimitar las condiciones de contorno existentes.

El material del que están compuestos los imanes permanentes es **NdFeB-30M** debido a sus excelentes propiedades magnéticas, que tiene una inducción magnética remanente con valor de 1.1 T y una permeabilidad magnética de 1.0446.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Grade	Remanence	Coercive Force	Intrinsic Coercive Force	Max. energy product	Max. Operating Temperature
	Br mT (kGs)	Grade kA/m (kOe)	H _{cj} kA/m (kOe)	(BH) _{max} kJ/m ³ (MGOe)	T _w
N35	1170-1220 (11.7-12.2)	≥ 868 (≥ 10.9)	≥ 955 (≥ 12)	263-287 (33-36)	80 °C
N38	1220-1250 (12.2-12.5)	≥ 899 (≥ 11.3)	≥ 955 (≥ 12)	287-310 (36-39)	80 °C
N40	1250-1280 (12.5-12.8)	≥ 907 (≥ 11.4)	≥ 955 (≥ 12)	302-326 (38-41)	80 °C
N42	1280-1320 (12.8-13.2)	≥ 915 (≥ 11.5)	≥ 955 (≥ 12)	318-342 (40-43)	80 °C
N45	1320-1380 (13.2-13.8)	≥ 923 (≥ 11.6)	≥ 955 (≥ 12)	342-366 (43-46)	80 °C
N48	1380-1420 (13.8-14.2)	≥ 923 (≥ 11.6)	≥ 876 (≥ 12)	366-390 (46-49)	80 °C
N50	1400-1450 (14.0-14.5)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 876 (≥ 11)	382-406 (48-51)	60 °C
N52	1430-1480 (14.3-14.8)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 876 (≥ 11)	398-422 (50-53)	60 °C
30M	1080-1130 (10.8-11.3)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 1114 (≥ 14)	223-247 (28-31)	100 °C
33M	1130-1170 (11.3-11.7)	≥ 836 (≥ 10.5)	≥ 1114 (≥ 14)	247-263 (31-33)	100 °C
35M	1170-1220 (11.7-12.2)	≥ 868 (≥ 10.9)	≥ 1114 (≥ 14)	263-287 (33-36)	100 °C
38M	1220-1250 (12.2-12.5)	≥ 899 (≥ 11.3)	≥ 1114 (≥ 14)	287-310 (36-39)	100 °C
40M	1250-1280 (12.5-12.8)	≥ 923 (≥ 11.6)	≥ 1114 (≥ 14)	302-326 (38-41)	100 °C
42M	1280-1320 (12.8-13.2)	≥ 955 (≥ 12.0)	≥ 1114 (≥ 14)	318-342 (40-43)	100 °C
45M	1320-1380 (13.2-13.8)	≥ 995 (≥ 12.5)	≥ 1114 (≥ 14)	342-366 (43-46)	100 °C

Tabla 4.1: Tabla de imanes permanentes NdFeB



Estudio de optimización de un engranaje magnético

El material empleado para realizar los soportes de los imanes y todas las restantes piezas ha sido **Aluminio**, material con que se ha realizado las ruedas que soportarán los imanes y los ejes, por simplificación. El aluminio es un material no ferromagnético. Es idóneo por su baja densidad con un valor de 2700 kg/m^3 . En el prototipo, eran de plástico o resina, pero magnéticamente se comporta de la misma manera que el aluminio.

La ventaja de utilizar un material como Aluminio es que al ser un material no ferromagnético no va a ser un elemento crítico en el diseño puesto que no va a modificar el campo magnético, por tanto es como si fuera un material inerte, a efectos prácticos. Se obtendrían por tanto, los mismos resultados con diferentes geometrías. En el diseño del proyecto se han usado principalmente dos modelos, una similar a la rueda aportada por el inventor y otra tratando de hacerla más ligera sobre todo pensando en una posible disminución del material empleado en su posible fabricación. A continuación se muestran dos detalles de las diferentes ruedas.

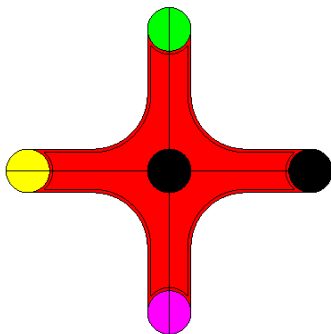


Figura 4.8: Modelo en forma de X

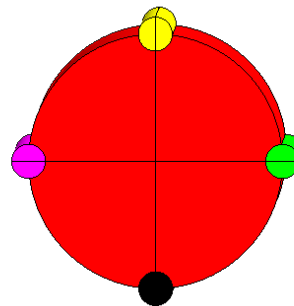


Figura 4.9: Modelo imitando una rueda

El modelo empleado en simulación ha sido elegido convenientemente en función del requerimiento de cálculo del ordenador donde se han simulado los resultados, puesto que el primer modelo es mucho más complejo; como consecuencia posee mayor número de puntos y líneas que generan más ecuaciones a resolver en ejecución que el segundo modelo cuya principal ventaja es el menor número de puntos, líneas, caras y volúmenes y por tanto, menos ecuaciones que permiten una ejecución más veloz de las simulaciones.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Además este modelo simplificado se ha utilizado cuando se han introducido un número elevado de ruedas por eje, o cuando se han variado el número de imanes por rueda, ya que se construye el modelo de forma más sencilla aplicando las herramientas de rotación, conocido fácilmente el ángulo de simetría.



Capítulo 5

Mejoras estudiadas al modelo presentado

5.1. Introducción

En este capítulo se especificarán todas las modificaciones efectuadas para mejorar el modelo a fin de obtener mayores pares mecánicos en los ejes de las ruedas, realizando las modificaciones oportunas tanto en la geometría, como en las propiedades físicas de las piezas, de modo que sea posible obtener un diseño final que permita optimizar el prototipo de partida.

Para ello, todas las modificaciones realizadas han partido del modelo original y se ha tratado de alterar lo menos posible la geometría existente; se ha tratado de respetar las cotas de cada una de las piezas, de modo que la comparación entre modelos se pueda realizar de modo directo.

Las mejoras realizadas en este proyecto fin de carrera van desde un simple análisis de fuerzas generadas por dos imanes cilíndricos hasta modelos más complejos donde existen varios ejes que poseen hasta 3 ruedas girando en sincronismo.

Para la correcta comprensión de los parámetros modificados, es necesario definirlos de modo explícito. Estos parámetros mantienen la misma nomenclatura



Estudio de optimización de un engranaje magnético

durante todo el documento para facilitar al lector la comprensión de la terminología empleada.

Los parámetros definidos a continuación, estarán referenciados o bien al sistema de coordenadas local o al sistema de coordenadas global y la unidad de medida será grados cegesimales.

El primer parámetro que es necesario definir es un ángulo que se denomina “*ANGLE*”, corresponde al parámetro fundamental en nuestras simulaciones; gracias a él, es posible analizar el comportamiento del sistema en todas las posiciones angulares de la rueda en un giro completo, porque expresa el giro producido por la rueda en cada instante. Por simetría, las simulaciones se ejecutan para 90 grados, y por ende, el comportamiento se repetirá cíclicamente. Este parámetro realizará un barrido por todos los valores comprendidos entre $-45 \leq ANGLE \leq 45$, con incrementos unitarios.

Para definir adecuadamente el sentido de giro de cada rueda, se ha instaurado un sistema de coordenadas local en cada rueda, por lo que se establece el correspondiente parámetro con el signo que modifica el sentido de giro adecuado haciendo además que éste gire de forma síncrona, al utilizar el mismo parámetro para las dos ruedas:

Definición del ángulo de giro

Sistema de coordenadas	Sentido de giro	Parámetro programado
Rueda_1	Horario	-ANGLE
Rueda_2	Antihorario	ANGLE

Tabla 5.1: Definición del ángulo de rotación para cada sistema de coordenadas local

Para la correcta comprensión, a continuación se muestran una serie de imágenes (ver Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4) que aclaran este concepto y que a continuación se explicarán con más detalle.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

En la Figura 5.1 se observa la ubicación de los sistemas de coordenadas locales de cada rueda, que en este instante la posición de dichos sistemas coincide con la orientación del sistema de coordenadas global del conjunto. Cada rueda está parametrizada en función del sistema de coordenadas anidado.

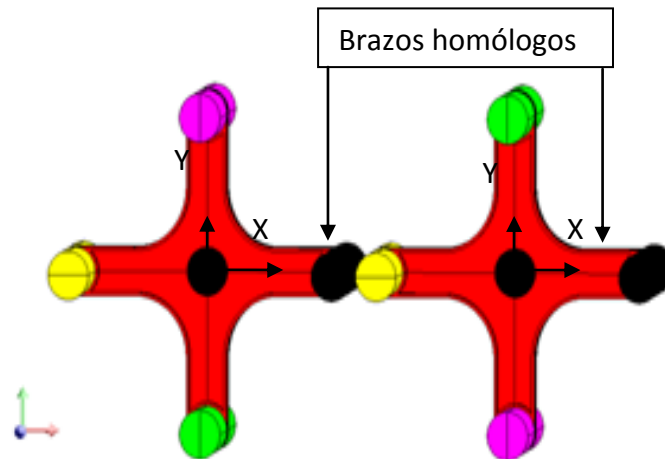


Figura 5.1: Ubicación de los sistemas de coordenadas locales alineados con el sistema de coordenadas global

Una vez comprendido la correcta ubicación de cada eje de coordenadas, se detallará la programación del parámetro “*ANGLE*”. En todos los modelos se ha inicializado la programación con el valor $ANGLE = -45$ realizando la simulación con incrementos unitarios, siendo monótona creciente. Una vez inicializados los parámetros a simular, las ruedas quedan orientadas como muestra la Figura 5.2.

Se puede observar cómo el sentido de giro impuesto al modelo (ver Tabla 5.1) condiciona la posición inicial de las ruedas y hará posible efectuar la simulación con los criterios impuestos al modelo. Es decir, la rueda_1 girará en sentido horario, hasta alcanzar el valor final de -45 grados; mientras que la rueda_2 alcanzará un valor final de 45 grados, obteniendo para cada paso de simulación los momentos generados en cada rueda con respecto al origen de coordenadas local de cada rueda.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

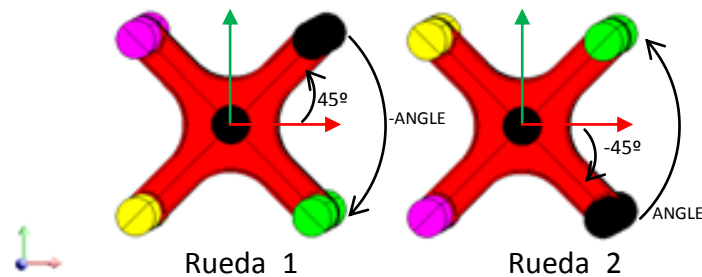


Figura 5.2: Posición inicial antes de comenzar cualquier simulación ($ANGLE = -45$) y sentido de giro durante la simulación

Una vez comprendido el primer parámetro geométrico definido, es posible definir el ángulo “*alpha*” que corresponde al ángulo de desfase existente entre ruedas homologas. Es un parámetro utilizado para el estudio del ángulo relativo de la rueda_2 respecto a la rueda_1, en que se mejora los esfuerzos en los ejes.

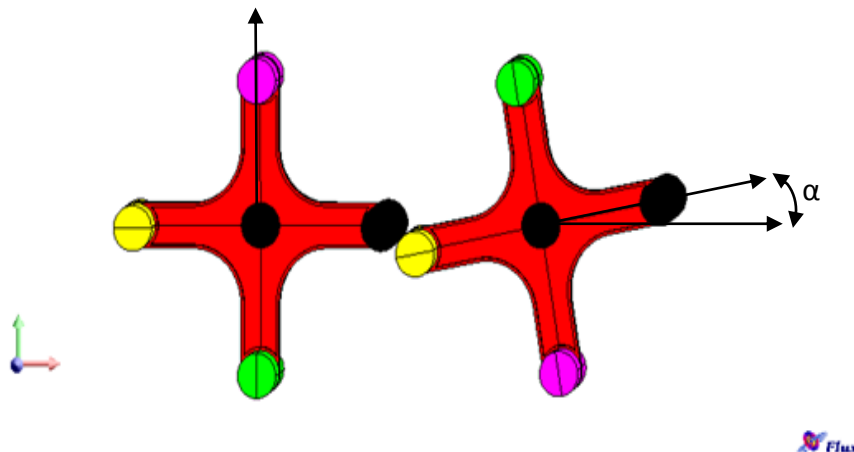


Figura 5.3: Desfase entre rueda_2 y rueda_1

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se debe aclarar que al realizar la simulación correspondiente, se debe mantener inalterable el ángulo “*alpha*” para toda la simulación, manteniendo el giro de las ruedas de modo síncrono. Una vez fijado, este ángulo de desfase “*alpha*” en la posición de referencia se imponen las condiciones iniciales de -45° y 45° al parámetro “*ANGLE*” para iniciar el barrido de la simulación de 90 grados. Por tanto, se programará el ángulo *alpha* de desfase oportuno y se realizará



Estudio de optimización de un engranaje magnético

la simulación modificando el valor de “*ANGLE*” para obtener los esfuerzos en el eje, manteniendo en todo momento el ángulo “alpha” de adelanto programado.

Dentro de las posibles orientaciones de imantación de los imanes permanentes, hay dos posibilidades: axial, con una orientación única, completamente determinada y la otra posibilidad es una orientación radial, considerando una sección de la pieza cilíndrica del imán permanente. Dentro de esta segunda posibilidad, se va a referenciar al sistema local de coordenadas de la rueda. El ángulo formado entre ese radio y el eje de abscisas del sistema local conforma el ángulo que denominamos “beta”.

Este parámetro se usa exclusivamente cuando el campo posea una orientación radial, ya que las líneas de campo pueden tener cualquier dirección perpendicular a lo largo de su superficie del cilindro, por lo que es imprescindible darle una orientación oportuna.

Como el sistema de coordenadas local gira solidario con la rueda, es posible definir el ángulo beta en función de este sistema y así se asegura que en cualquier posición de la rueda, la orientación del campo se mantendrá en la orientación escogida, como se puede apreciar en la Figura 5.4.

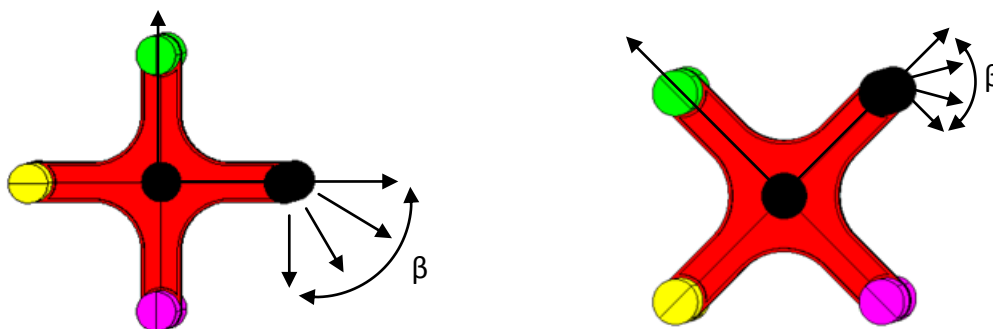


Figura 5.4: Orientación axial del campo para *ANGLE*=0 y *ANGLE*=45

Para concluir, es necesario precisar que durante todas las simulaciones se busca obtener los momentos mecánicos producidos por las fuerzas de repulsión de los imanes en el eje de la rueda correspondiente, permaneciendo la distancia del centro



Estudio de optimización de un engranaje magnético

de la rueda hasta la directriz del cilindro siendo constante su valor (d); a continuación, se muestra su ecuación 12

$$M_{eje} = F_{repulsion} * d \quad (12)$$

Una vez calculados todos los pares de cada eje es necesario poder interpretarlos y sumarlos teniendo en cuenta el sentido de giro.

Es decir, si se tienen dos ruedas, se deberá obtener el par neto del sistema, restando del par obtenido por la rueda_2, el par necesario para hacer mover el sistema, que viene representado por el par de la rueda_1. Por ello, se obtiene la siguiente ecuación

$$Par_{neto\ útil} = MAGNET_TORQUE_{(2 - 1)} = MAGNET_TORQUE_{(2)} - MAGNET_TORQUE_{(1)} \quad (13)$$

Los pares obtenidos si son positivos ya sean en una rueda o en otra siempre forzarán a girar en sentido antihorario. Si se considera el par positivo en la rueda_2 como capaz de transmitir una energía, se puede tener una doble posibilidad.

1. La rueda_1 tiene un par positivo. Le hará girar en sentido antihorario pero para que las dos ruedas giren en sincronismo ese par tendrá que ser contrarrestado por un efecto externo que permita girar la rueda_1 en sincronismo con la rueda_2
2. La rueda_2 tiene un par negativo. Le hará girar en sentido horario y por tanto la rueda_1 seguirá girando en el sentido adecuado sin necesidad de aportar energía externa y las ruedas girarán en sincronismo.

A continuación, se detalla la elaboración de cada propuesta.



5.2. Búsqueda de la posición relativa de la segunda rueda.

5.2.1. Evaluación del modelo

Se conoce que la máxima repulsión entre dos imanes se produce cuando la distancia es mínima, por tanto, sería posible mejorar el funcionamiento del conjunto minimizando dicha distancia.

El primer análisis realiza una simulación para obtener un ángulo de desfase entre brazos homólogos (ver Figura 5.1) que mejore el comportamiento actual del sistema. Por ello, se realizó un modelo en el que se pudiera modificar fácilmente el ángulo de desfase de la RUEDA_2, a través del parámetro “alpha”.

La orientación del campo magnético para toda esta simulación será axial, respetando la configuración de partida.

En esta simulación se trata de buscar el ángulo “alpha” idóneo de desfase entre brazos homólogos (ver Figura 5.3) que permita obtener los mejores resultados posibles.

Se ha simulado el funcionamiento del sistema durante un cuarto de vuelta, es decir, se ha realizado el barrido habitual del ángulo “ANGLE” desde el valor inicial de -45 grados hasta 45 grados recorriendo por tanto 90 grados, y por simetría se conoce el comportamiento para toda la vuelta. Si se posicionan inicialmente las ruedas con la rueda_2 con su ángulo de desfase “alpha” correspondiente, se debe asegurar el movimiento síncrono de las ruedas con el ángulo de desfase constante.

5.2.2. Simulaciones realizadas

Para la simulación del modelo es necesario realizar un estudio multiparamétrico, de modo que se puede evaluar todas las combinaciones posibles de los dos parámetros, tanto del ángulo “alpha” como del parámetro “ANGLE”.

Para esta simulación se han analizado 7 modelos variando el ángulo de desfase α , que a continuación se detalla los valores que comprende la tabla:



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Simulaciones realizadas

Parámetro inicial de simulación	Parámetro final de simulación	Ángulo de desfase entre brazos homólogos (α)
-45	45	0º
-45	45	10º
-45	45	20º
-45	45	30º
-45	45	40º
-45	45	45º
-45	45	50º

Tabla 5.2-. Ángulo α para cada simulación realizada

A continuación se muestran los datos obtenidos de la simulación correspondiente al valor de $\alpha=0$ que corresponde con el valor con mayor área positiva. El resto de simulaciones se pueden consultar en el anexo 8.1.2 (ver pág.VI hasta pág. XXXI)



Estudio de optimización de un engranaje magnético

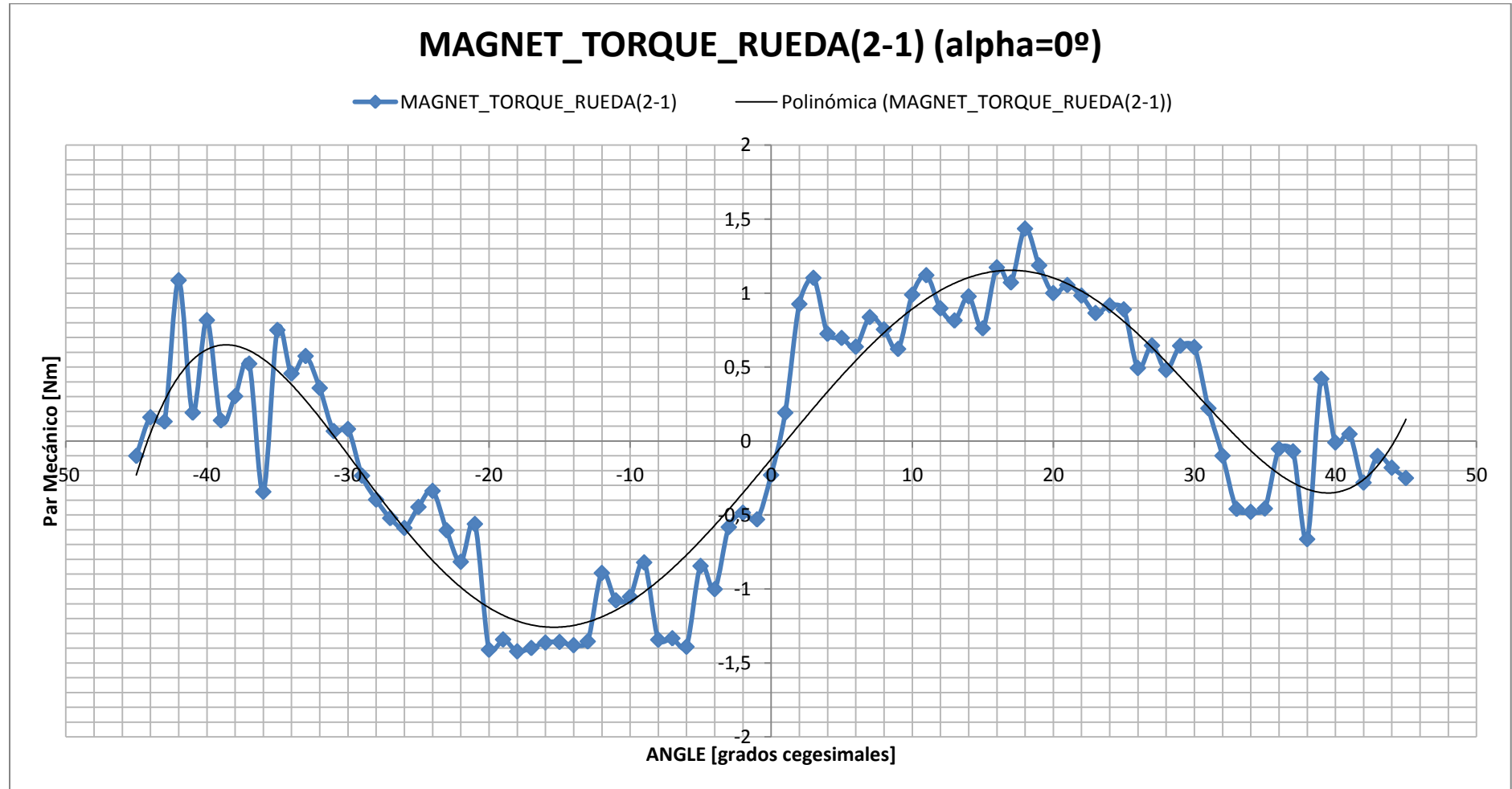


Figura 5.5: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=0^\circ$



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.2.3. Conclusiones

Tras la realización de todas las simulaciones, se ha obtenido diferentes tablas con todos los pares mecánicos por rueda en función de la posición angular.

La Figura 5.5 representa el par mecánico neto obtenido para una configuración del parámetro $\alpha=0$. Este par resulta de la sustracción del par obtenido en la rueda_2 y el par aportado por el motor ubicado en la rueda_1.

Esta gráfica muestra una simetría y una periodicidad que permite extraer un intervalo aproximado de 30 grados (del $\text{ANGLE}=0$ a $\text{ANGLE}=30$) donde el par mecánico neto es positivo y es posible realizar la transferencia mecánica positiva, y por el contrario desde $\text{ANGLE}=-30$ a $\text{ANGLE}=0$ es necesario aportar energía para contrarrestar el par negativo neto obtenido.

Del análisis de las diferentes gráficas obtenidas se concluye que el ángulo α debe ser cero o próximo a cero para maximizar el funcionamiento del modelo. Se puede observar analizando las gráficas adjuntas en el anexo 8.1.2, cómo los valores de par decaen según se incrementa el valor de α



5.3. Fuerzas producidas por la repulsión de 2 imanes libres de NdFeB enfrentados entre sí.

5.3.1. Evaluación del modelo

Analizado el prototipo inicial y realizadas las primeras modificaciones, se propondrá una variación en la dirección del campo magnético. Se conoce que un bloque cilíndrico de NdFeB, solo puede tener dos disposiciones de campo magnético: axial y radial.

Anteriormente, se ha simulado qué ángulo es el idóneo para mejorar el comportamiento del sistema, y a continuación se detallará como la distancia modifica las fuerzas sobre los imanes. Se trata de obtener la distancia que permita obtener la máxima fuerza de repulsión para generar el máximo par mecánico posible.

Para realizar esta simulación se ha conservado la geometría de los imanes utilizados en el modelo anterior, es decir, un cilindro que posee una longitud de 80mm y un diámetro de 20mm, respectivamente.

Esta simulación se ha centrado en la búsqueda de la orientación del campo magnético adecuada para el prototipo, analizando dos configuraciones; la primera consta de dos imanes orientados en la dirección axial y posteriormente radial. Por tanto, se tratará de valorar qué disposición del campo permite obtener un par mayor en el eje, debido a que el momento en el eje es proporcional a la fuerza de repulsión, teniendo en cuenta que la distancia del brazo del imán es constante, ver la ecuación 12.



5.3.2. Simulaciones realizadas

5.3.2.1. Orientación axial del campo.

En este primer caso estudiado, la orientación del campo está en la dirección del eje del cilindro. Esto supone que las fuerzas de repulsión serán menores debido a que las líneas de campo deben recorrer mayores distancias, pero habrá más recorrido donde se repelan los imanes frente a una disposición de orientación radial.

Como consecuencia de esto, surgen dos efectos; por un lado, la longitud de la reluctancia debido a la longitud a recorrer en el aire de un extremo a otro y por otro lado, el efecto del flujo saliente por un extremo se distribuye uniformemente por toda la periferia de toda la pieza cilíndrica cuando en realidad la interacción con el campo de la otra pieza se produce en un área muy pequeña en relación a la superficie lateral del cilindro.

Una línea de campo, es la curva cuya tangente proporciona la dirección del campo en ese punto. Estas líneas son imaginarias y no tienen presencia física.

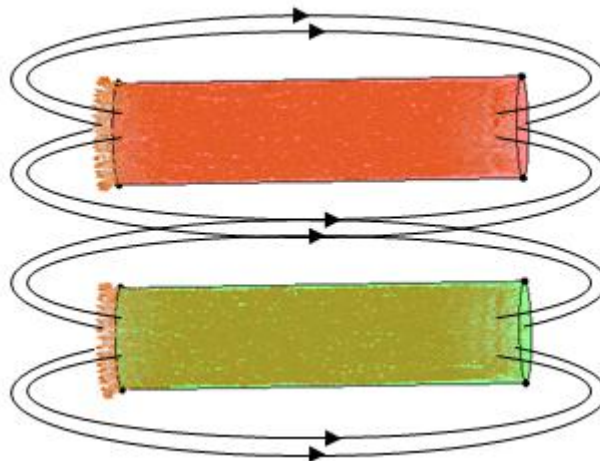


Figura 5.6: Líneas de campo sobre un cilindro con orientación de campo longitudinal

Una vez diseñado los dos cilindros, generado el mallado, y asignada la orientación del campo magnético convenientemente se ha procedido a solucionar el sistema generando un valor de fuerza para cada incremento de separación entre ambos. Se han obtenido todos los valores de fuerza en el imán para las distancias



Estudio de optimización de un engranaje magnético

comprendidas entre 0mm y 30mm (los datos se muestran en el anexo 8.1.3), y con estos parámetros se ha obtenido la siguiente gráfica:

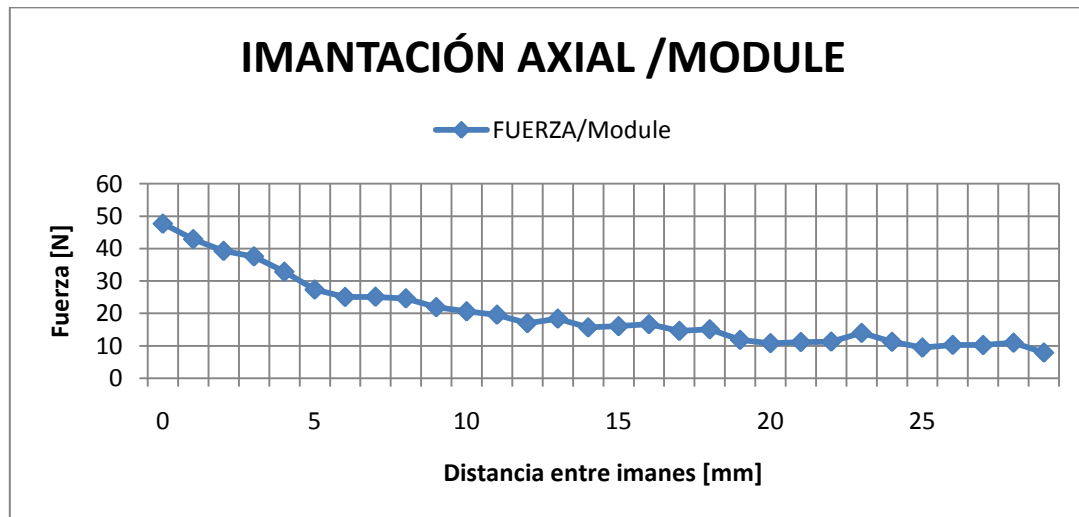


Figura 5.7: Distribución de fuerzas respecto a la distancia de separación entre imanes

En la Figura 5.7 se observa la dependencia de la fuerza en función de la distancia que las separa; se observa cómo a medida que la distancia entre los imanes aumenta, las fuerzas de repulsión disminuyen debido al incremento de entrehierro formado.

5.3.2.2-. Orientación radial del campo

Para la comparación con el modelo anterior, se han utilizado los mismos volúmenes pero variando la orientación de los imanes NdFeB por una orientación diametral del campo, de modo que se favorezca la repulsión en una determinada dirección del sistema de coordenadas, este ángulo preferente se denotó anteriormente como “beta” (ver epígrafe 5.1) y será motivo de estudio más adelante.

Según la configuración de campo escogida, las líneas recorren una distancia menor y de este modo, la reluctancia a través de aire será menor y la interacción de los dos campos será más completa que en el caso anterior (ver Figura 4.6), con lo que la



Estudio de optimización de un engranaje magnético

repulsión que se produce entre dos imanes se incrementa considerablemente, como se verá más adelante.

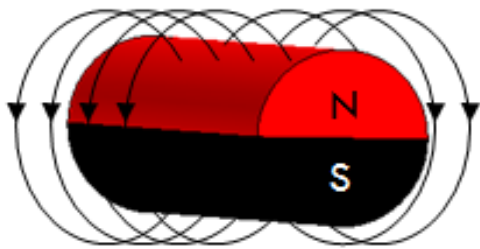


Figura 5.8: Líneas de campo en el imán

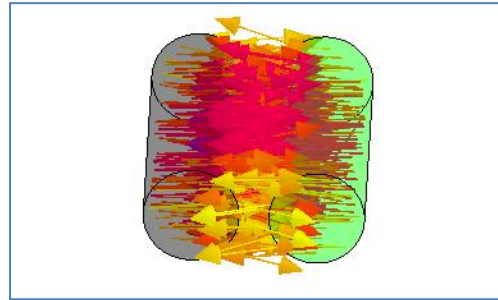


Figura 5.9: Interacción del campo

Para realizar dicha simulación, se ha utilizado la configuración más favorable para dos imanes libres, que consta de una orientación coincidente con el eje de abscisas del sistema de coordenadas local. Por tanto, el ángulo queda determinado por su valor $\beta=0$ para esta simulación.

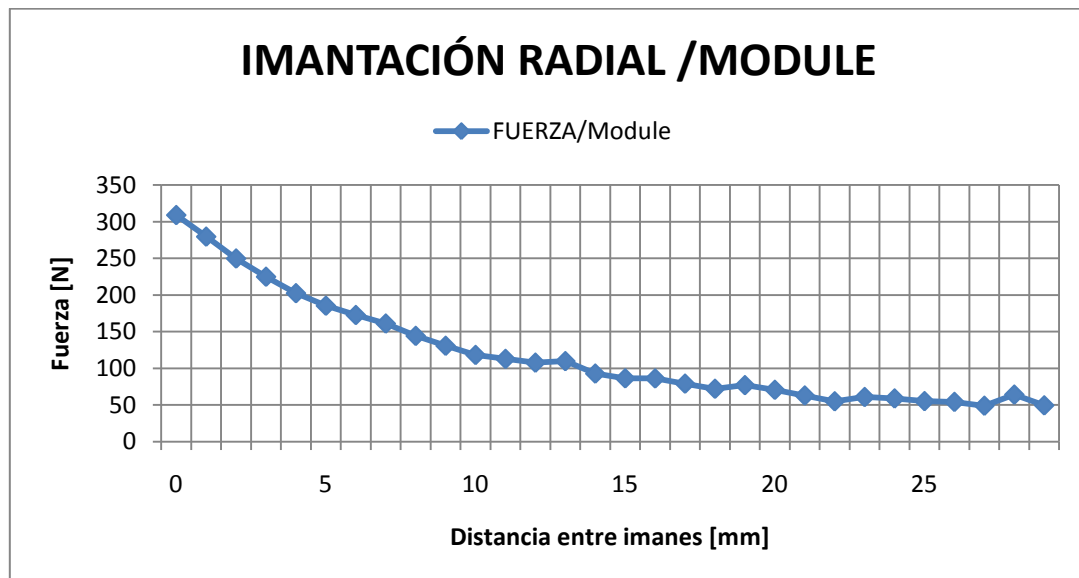


Figura 5.10: Representación gráfica de la fuerza vs. distancia entre imanes

En la Figura 5.10 se observa como a medida que la distancia entre imanes aumenta las fuerzas producidas por la repulsión de los imanes va disminuyendo de forma notoria, lo que indica que en los futuros diseños se debe colocar los imanes lo



Estudio de optimización de un engranaje magnético

más cercanos posible manteniendo una tolerancia para evitar el contacto debido a las dilataciones que pueda sufrir la rueda y a las variaciones de tamaño debidas a la inercia del sistema.

Por otro lado, los valores resultantes para esta orientación son notablemente superiores a los valores obtenidos en la simulación anterior. Esto se debe fundamentalmente a que la reluctancia en los recorridos de las líneas de campo a través del aire son menores y que existe mayor concentración de flujo en los puntos de aplicación.

Por esta razón, los modelos realizados de aquí en adelante estarán simulados con este tipo de orientación, siendo de especial relevancia un estudio posterior acerca de la obtención del parámetro “beta” que maximiza el rendimiento.

5.4. Análisis del modelo con imanes de orientación radial del campo magnético.

5.4.1. Evaluación del modelo

El estudio trata de analizar el par obtenido en el eje producido por el efecto del campo magnético de los imanes contenidos en cada rueda. Para ello, se ha modificado la orientación de imantación, pasando de axial a radial.

Las características geométricas del modelo no han sido modificadas respecto del modelo anterior, configurando los parámetros anteriormente explicados (ver epígrafe 5.1) $\alpha=0$ y $\beta=0$. y realizando el barrido de la simulación especificado anteriormente, entre los valores de “ANGLE” comprendidos entre -45 y 45 grados.

Para la determinación de la orientación correcta de cada imán según la posición que ocupa, se toma como referencia el sistema de coordenadas local de cada rueda; de forma que el eje X coincida con la dirección del brazo 1 (ver Figura 5.11), y el eje Y con la dirección del brazo 2, quedando definido inequívocamente.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.4.2. Simulaciones realizadas

Como en la simulación anterior, se han definido los parámetros del ángulo de giro con el procedimiento aplicado anteriormente, como se puede ver en la Tabla 5.3.

Imán	Ángulo
Imán Negro	β
Imán Verde	$\beta+90$
Imán Amarillo	$\beta+180$
Imán Magenta	$\beta+270$

Tabla 5.3-. Orientación del campo en el software Flux

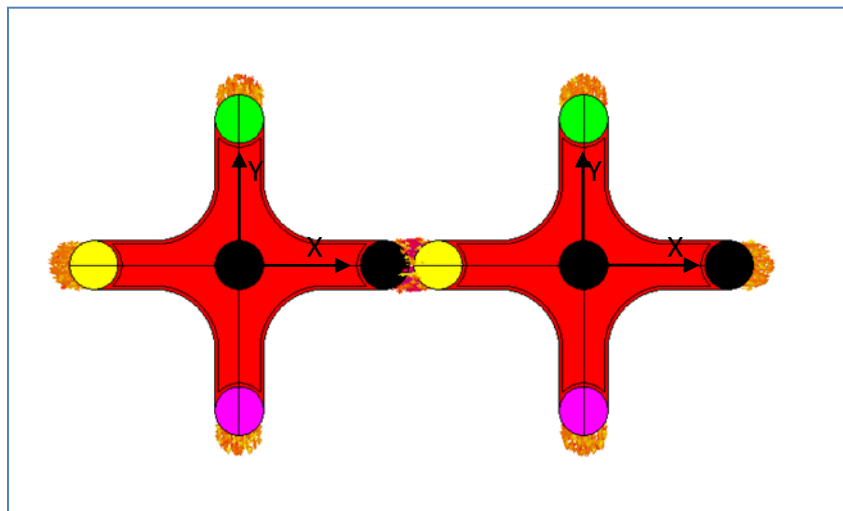


Figura 5.11: Modelo simplificado de dos aspas con una configuración de campo radial.

A continuación, se muestra tanto el comportamiento del par mecánico por rueda como el par mecánico neto, que se obtiene de la sustracción de los pares individuales, cuyos valores se recogen en el anexo 8.1.4.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

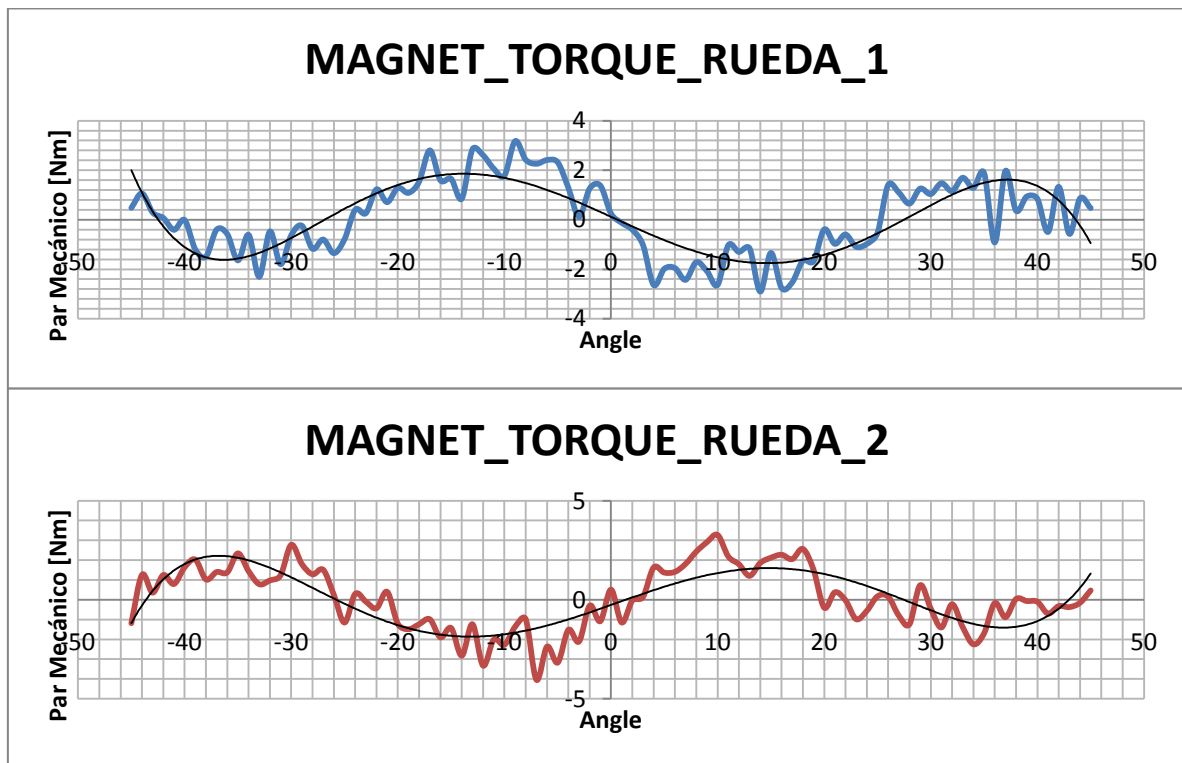


Figura 5.12: Gráfica del par mecánico por rueda para el modelo de dos ruedas con $\alpha=0$ y $\beta=0$



Estudio de optimización de un engranaje magnético

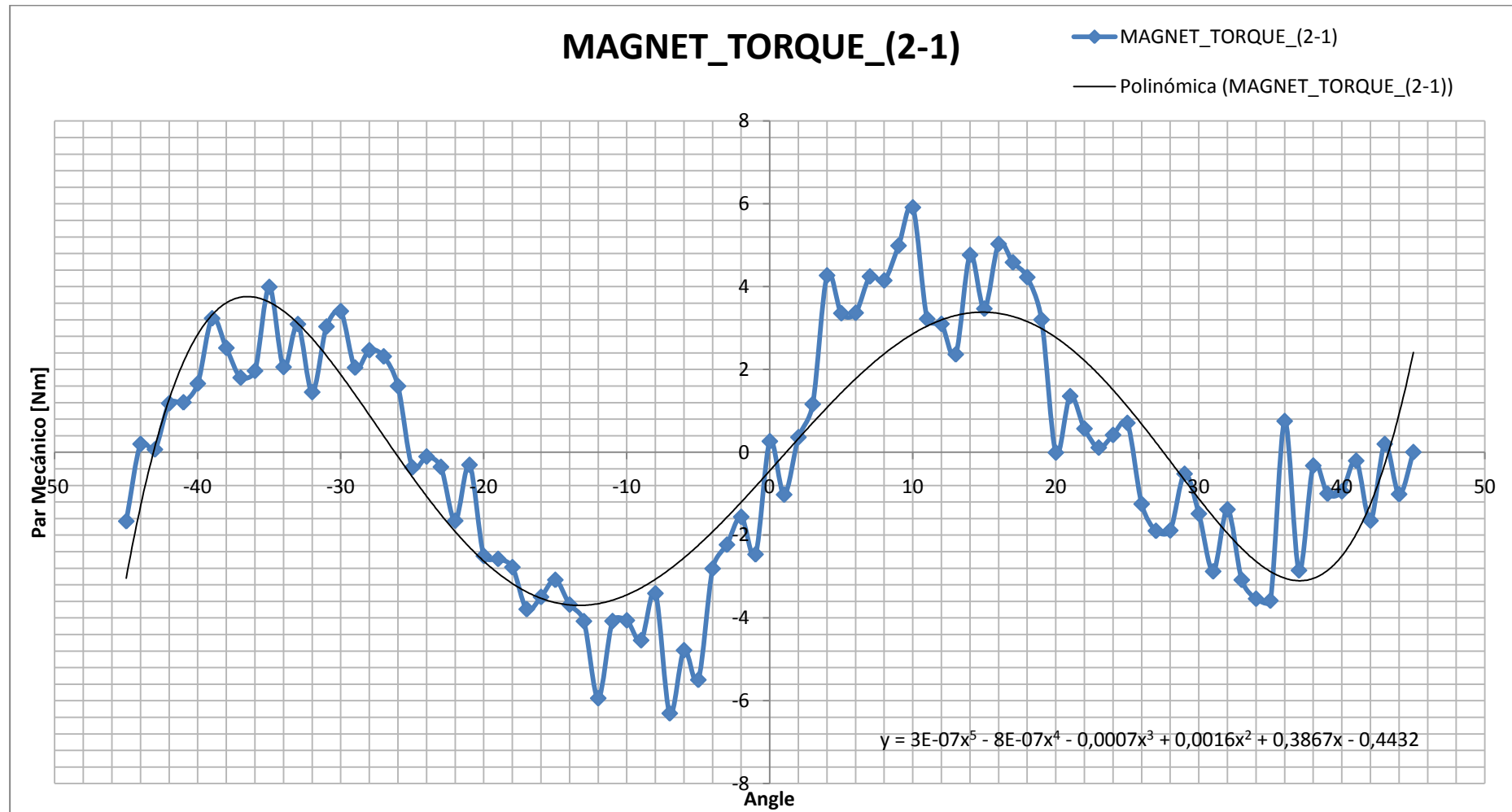


Figura 5.13: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=0$ y $\beta=0$



5.4.3 Conclusiones.

Si se realiza la comparación entre las dos gráficas mostradas en las Figura 5.5 y Figura 5.13 se observa la similitud en la forma de onda a diferencia de la curvatura más pronunciada de la orientación radial, debido a las conclusiones obtenidas en el epígrafe 5.3.2, en el que se demostraba que la orientación de imantación radial proporcionaba mayores fuerzas de repulsión originando mayores pares mecánicos como se observa en la siguiente gráfica.

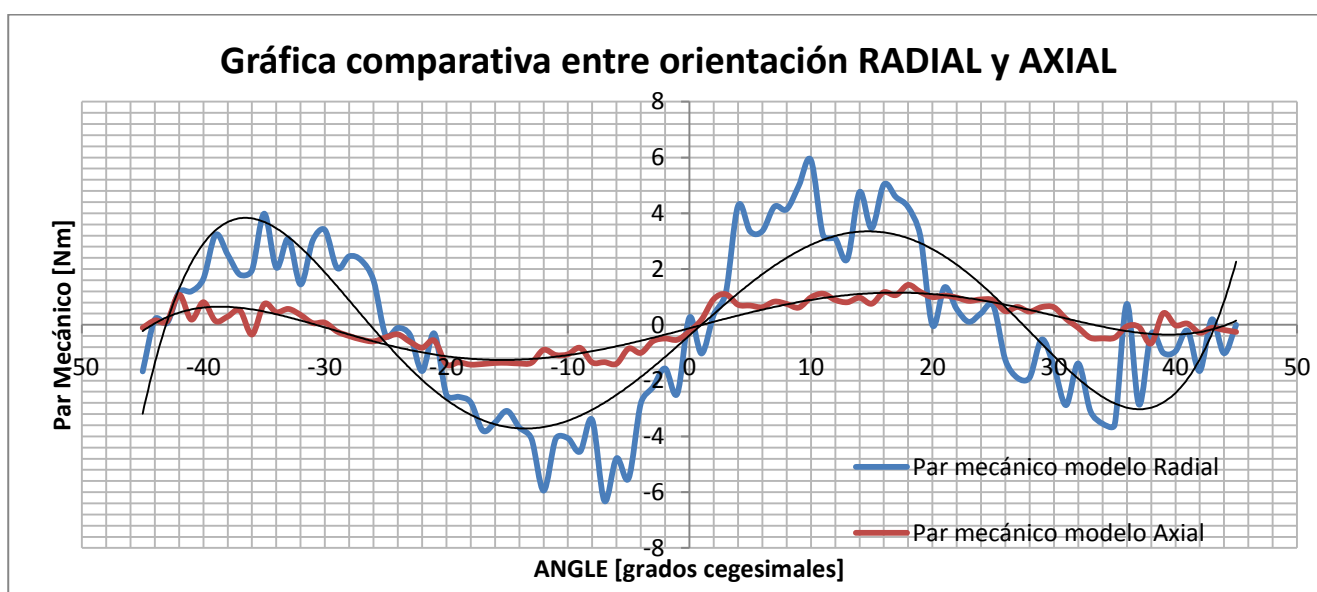


Figura 5.14: Gráfica comparativa entre orientación radial y axial

Se observa cómo en la Figura 5.14 coinciden ambas gráficas en los pasos por cero que se producen para un valor del parámetro “ANGLE” de -45, 0 y 45 grados. Por tanto, el comportamiento de las ruedas con los imanes orientados en una disposición radial es mucho más favorable que la orientación axial.



5.5. Estudio de la influencia del ángulo de inclinación del campo magnético

5.5.1. Evaluación del modelo

Una vez analizada la necesidad de utilizar unos imanes con orientación radial como mejora al modelo inicial, surge la necesidad de estudiar cuál es el ángulo “beta” necesario para obtener el ángulo que mayores repulsiones de los imanes genera y así obtener un par mayor en los ejes.

Para esta simulación se han enfrentado dos ruedas inmóviles en dos situaciones diferentes ($\text{ANGLE}=0$, $\alpha=0$ y $\alpha=10$ grados), por lo que se ha realizado un barrido del ángulo “beta” desde 0 grados hasta -60 grados (ver Figura 5.15), manteniendo constante el valor de “alpha” para cada simulación, de modo que es posible analizar el comportamiento del par en el eje en función del ángulo “beta”, con la rueda inmóvil.

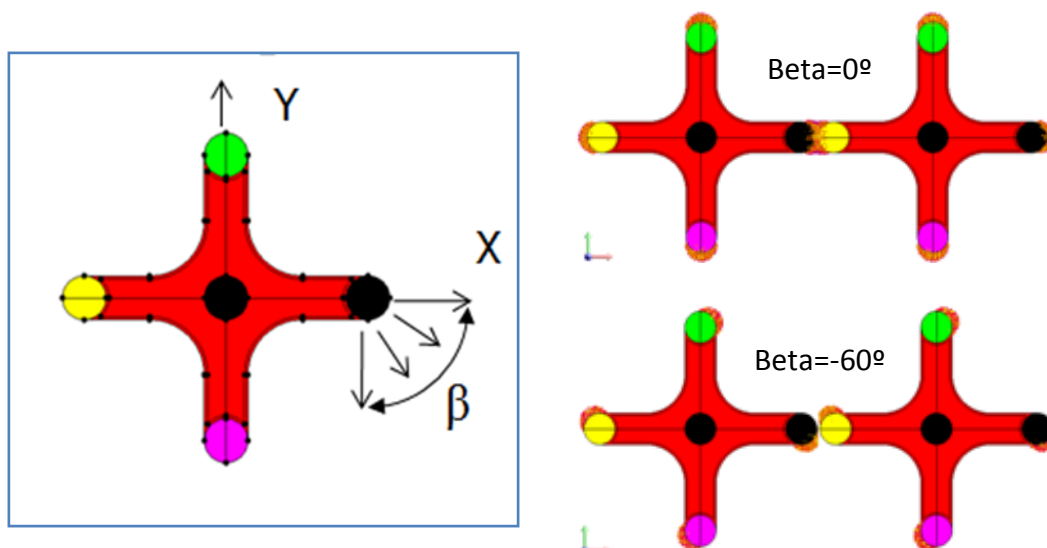


Figura 5.15: Ángulo β de orientación del campo radial con $\alpha=0$

Se han realizado simulaciones sin modificar el ángulo de rotación “ANGLE” inicializado en un valor de 0 grados, para toda la simulación.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.5.2. Simulaciones realizadas

Los resultados obtenidos de las siguientes simulaciones se pueden consultar en el anexo 8.1.5. (pág. XXXVI)

5.5.2.1. Simulación para $\alpha=0$ grados

El primer estudio realizado se configuró el parámetro α igual a cero; como se ha indicado anteriormente sólo se modifica la orientación de imantación β , desde 0 grados hasta -60 grados. El resultado de la simulación se muestra en la siguiente gráfica:

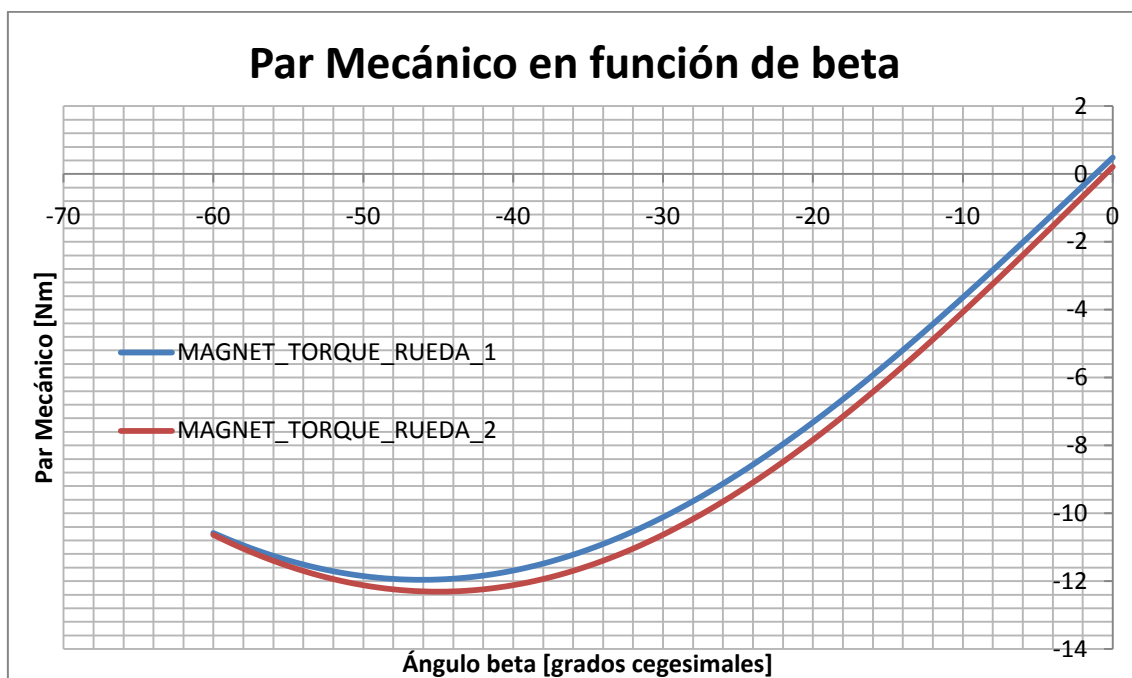


Figura 5.16: Gráfica del par mecánico en función de β con $\alpha=0$ y $\text{angle}=0$

De esta gráfica se puede concluir que cuando las ruedas están ubicadas en la posición $\text{ANGLE}=0$ y con $\beta=0$, cuya representación gráfica se muestra en la Figura 5.15, se observa que existe simetría en el modelo y por tanto, el par mecánico en el eje es nulo. Éste, produce un comportamiento de equilibrio inestable, que podría modificar el movimiento de las ruedas, frenándolas o llegando a detenerlas, si fuera posible.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema y que no existan estos equilibrios inestables, se propone adelantar la rueda_2 en $\alpha=10$ grados (se puede recordar este concepto en figura 5.3), de modo que no coincida su paso por el eje de abscisas.

5.5.2.1. Simulación para $\alpha=10$ grados

Se ha realizado un nuevo estudio paramétrico con la configuración $\text{ANGLE}=0$, $\alpha=10$ y valores de β comprendidos entre 0 y -60 grados. A continuación se detalla el resultado obtenido.

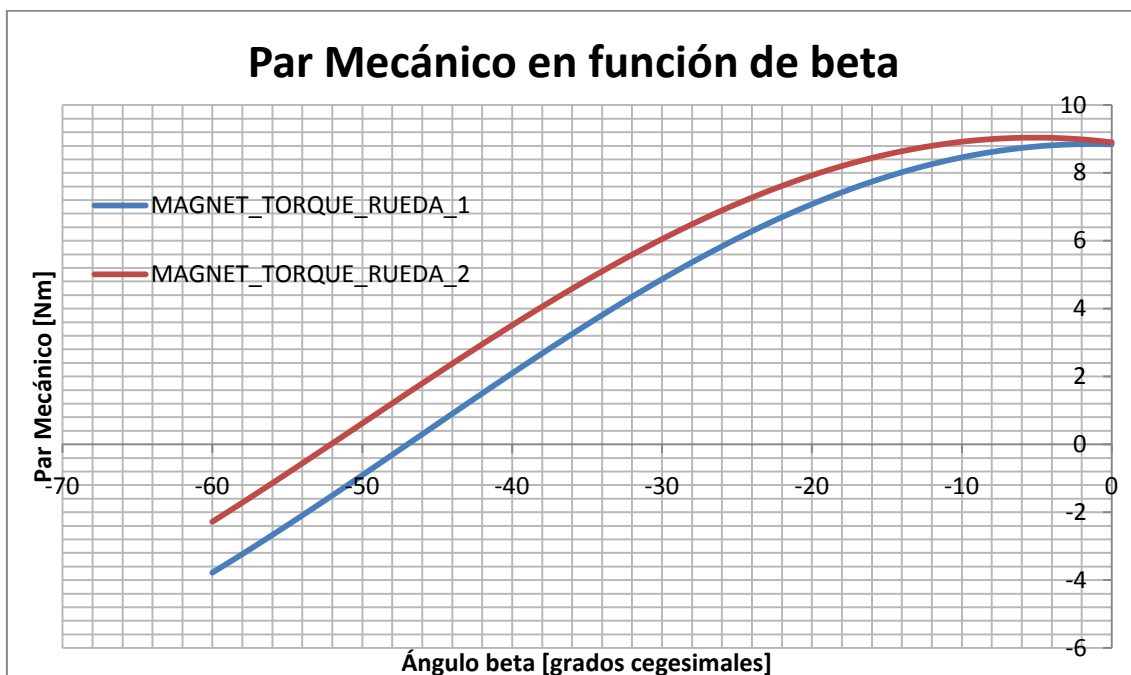


Figura 5.17: Par mecánico en función de β con $\alpha=10$ y $\text{angle}=0$

*** También se han realizado simulaciones para $\alpha=-30$ grados y $\alpha=-45$ grados, pero al no obtener resultados que mejoren el comportamiento de éstos, no se han tenido en cuenta para realizar el documento.*



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.5.3. Conclusiones

Como se observa en la gráfica anterior si se utiliza una disposición con un cierto decalaje entre las ruedas no existirán equilibrios inestables que puedan perturbar el correcto giro de las ruedas; por tanto, su movimiento siempre será predecible. De la Figura 5.17 obtenida de la simulación con $\alpha=10$, se obtiene un rango de valores para beta donde el comportamiento del par se puede considerar constante que comprende los valores entre 0 y -15 grados, aproximadamente. Por esta razón, las simulaciones contempladas en los siguientes apartados incluirán estas modificaciones geométricas en el diseño del modelo que se han obtenido.



5.6. Modelo de dos ruedas con $\alpha=10$ grados

5.6.1. Evaluación del modelo

Tras el análisis de las conclusiones obtenidas en los modelos anteriores, se ha realizado un modelo que las integre todas las modificaciones, es decir, se ha construido un modelo de dos ruedas cuya rueda_2 está desfasada en un valor de $\alpha=10$ grados (recuérdese, ángulo de desfase de la segunda rueda respecto del sistema de coordenadas global) y una orientación de campo magnético radial (β) comprendido entre 0 grados y -15 grados.

Como es habitual se realizará barrido del ángulo "ANGLE" entre los valores -45 y 45 grados para obtener el par magnético por rueda en cada paso de simulación.

Como se estudió en el apartado anterior, se pretende que nunca se alcance un estado de equilibrio inestable, sino que siempre exista una repulsión para que el sistema no trate de frenarse; por ello, se han orientado las ruedas con un ángulo de desfase $\alpha=10$ grados respecto a la rueda ubicada a su izquierda para favorecer el sentido de giro impuesto y de esta manera tratar de no frenar al conjunto (ver Figura 5.18).

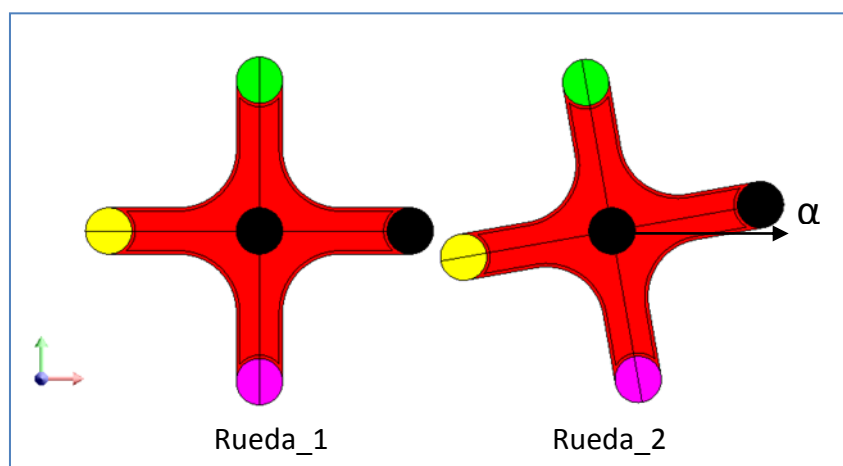


Figura 5.18: Modelo de dos ruedas con su ángulo $\alpha=10$ grados



5.6.2. Simulaciones realizadas

A continuación, se especifica los valores que toman los distintos sistemas de coordenadas locales para la realización de la simulación:

Rueda	Decalaje
Rueda_1	0
Rueda_2	10

Tabla 5.4: Relación del ángulo α para el modelo de 2 ruedas.

El movimiento de las ruedas se hace acorde al resto de simulaciones realizadas anteriormente, es decir, la Rueda_1 en sentido horario mientras que la Rueda_2 gira en sentido antihorario.

5.6.2.1 Simulación para $\beta=0$

Se ha programado el ángulo $\beta=0$ grados ya que como se concluyó anteriormente este parámetro maximizaba el par en los ejes de las ruedas. A continuación se muestran los resultados de la simulación que corresponden a los valores mostrados en el anexo 8.1.6.1. (pág. XL):



Estudio de optimización de un engranaje magnético

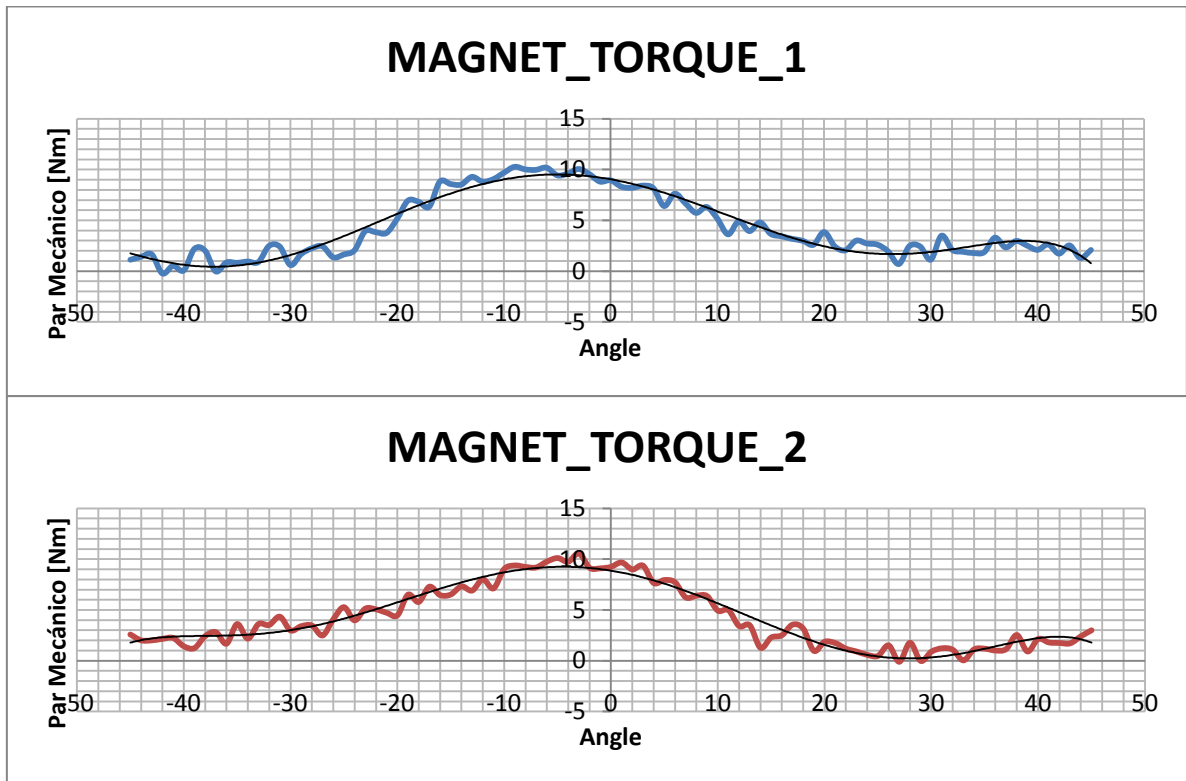


Figura 5.19: Gráfica de par mecánico en cada eje para el modelo de dos ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=0$ grados

En la Figura 5.19, se representa el comportamiento de cada rueda, y como se observa sus curvas son análogas. La ventaja de ubicar una rueda adelantada respecto de la otra es que permite que la curva sea completamente positiva, y no suceda como en modelos anteriores donde las curvas fluctuaban entre periodos positivos y negativos (ver Figura 5.12); esta situación permitiría mejorar el control del motor que accionaría el mecanismo.

Esta topología simplifica el control de los sentidos de giro, respecto del modelo anterior (ver epígrafe 5.4, Figura 5.12), puesto que la rueda_2 se va a ver constantemente repulsada por la rueda_1, gracias a su adelanto respecto a la rueda_1. Para este modelo, sólo se debe aplicar un esfuerzo motor a la rueda_1, lo cual es una mejora desde el punto de vista funcional.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.6.2.2. Simulación para $\beta = -15$

Para esta simulación, simplemente se ha modificado el parámetro $\beta = -15$ grados permaneciendo el resto de parámetros configurados del mismo modo, con lo que las gráficas obtenidas son:

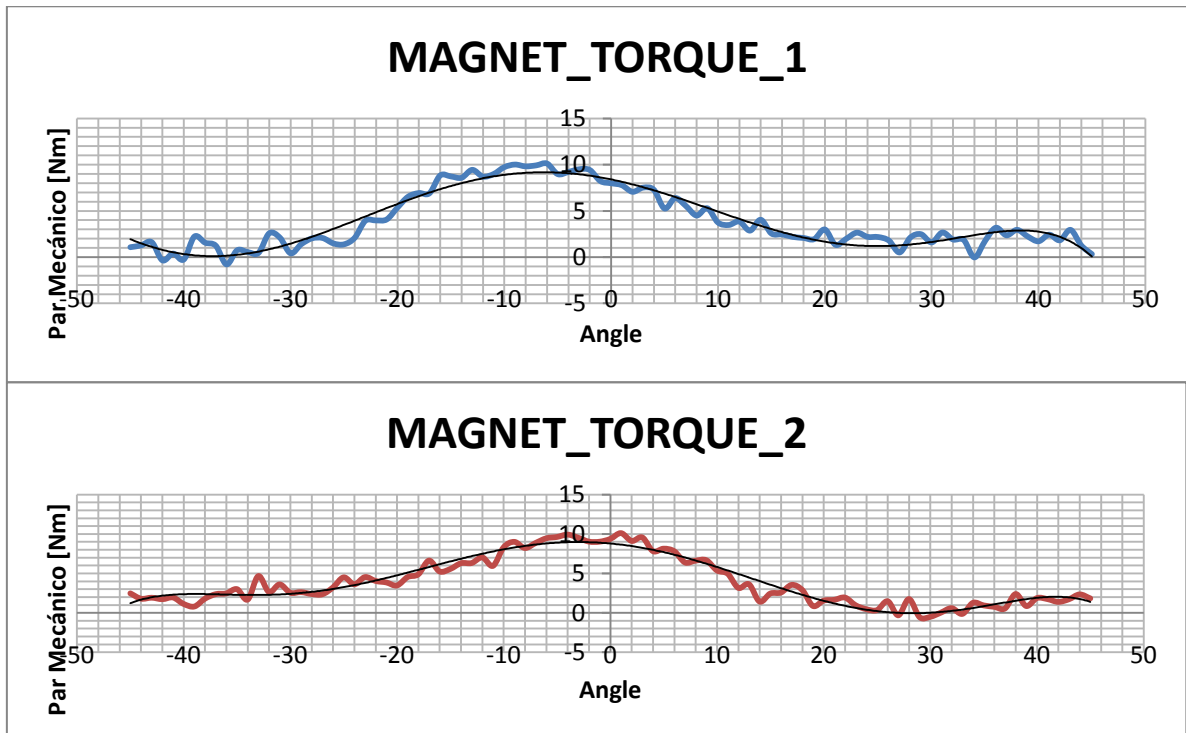


Figura 5.20: Gráfica de par mecánico en cada eje para el modelo de dos ruedas con $\alpha = 10$ grados y $\beta = -15$ grados

5.6.3. Conclusiones

Los valores obtenidos para este valor de β son un inferiores al modelo de $\beta = 0$, aunque prácticamente inapreciables; se pueden observar mejor estos valores contrastando los valores obtenidos de las simulaciones en el anexo, donde están recogidos todos los valores de la simulaciones realizadas (ver anexo 8.1.6).



5.7. Modelo de 3 ruedas

5.7.1- Evaluación del modelo

Tras analizar los resultados de los modelos de dos ruedas, se ha incluido una nueva rueda montada en un tercer eje respetando las mismas distancias, geometría y número de imanes que las anteriores.

Se pretende analizar la influencia de una tercera rueda que girará en sincronismo con las otras ruedas aunque interactuará directamente sólo con la contigua.

Este nuevo eje se ha incluido a la derecha del modelo de dos ruedas, de forma que ahora el conjunto está formado por tres ejes horizontales, paralelos, y a una distancia equidistante de 152 mm. entre el centro de gravedad de dos ruedas adyacentes.

Se espera que mejore los resultados obtenidos por los modelos anteriores de 2 ejes, puesto que ahora con el esfuerzo motor ejercido en el primer eje, se induce el giro de 2 ruedas, simplemente por magnetismo.

Para ello se ha realizado un modelo en el que las ruedas presentan un ángulo de inclinación diferente entre sí, para evitar entrar en puntos de equilibrio inestables, como se vio en el apartado anterior; si estuviesen los todos los ejes alineados con el eje x, estaría en equilibrio puesto que los esfuerzos estarían contrarrestados, mientras que si se produce una perturbación en el sistema, éste comenzará a girar, por repulsión.

Rueda	Decalaje
Rueda_1	0
Rueda_2	10
Rueda_3	-20

Tabla 5.5-. Relación del ángulo alpha en función de la rueda



Estudio de optimización de un engranaje magnético

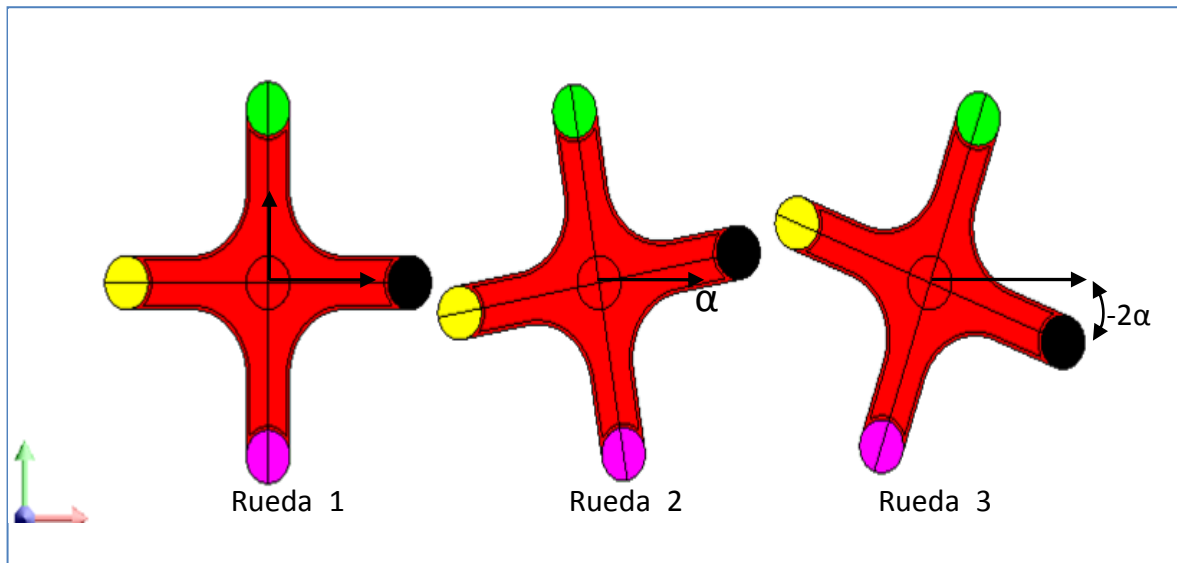


Figura 5.21: Detalle de los ángulos de inclinación respecto al eje global situado sobre rueda 1

Dada la geometría del modelo, se ha impuesto el sentido de giro adecuado para favorecer el movimiento de las ruedas; de forma que la Rueda_1 y la Rueda_3 giran en sentido horario y la Rueda_2 gira en sentido antihorario.

De esta forma, se potencia la repulsión de los imanes favoreciendo la confrontación NORTE-NORTE o SUR-SUR, que obtiene sus valores máximos de repulsión próximos al eje de abscisas, del sistema de coordenadas global, por ser mínima la distancia entre los imanes.

En función de los resultados obtenidos en los modelos anteriores, se han realizado dos simulaciones con los parámetros que mejores resultado han demostrado, dichos valores se muestran en la siguiente tabla:

Simulación	Ángulo β
Simulación 1	0°
Simulación 2	-15

Tabla 5.6-. Definición del ángulo β



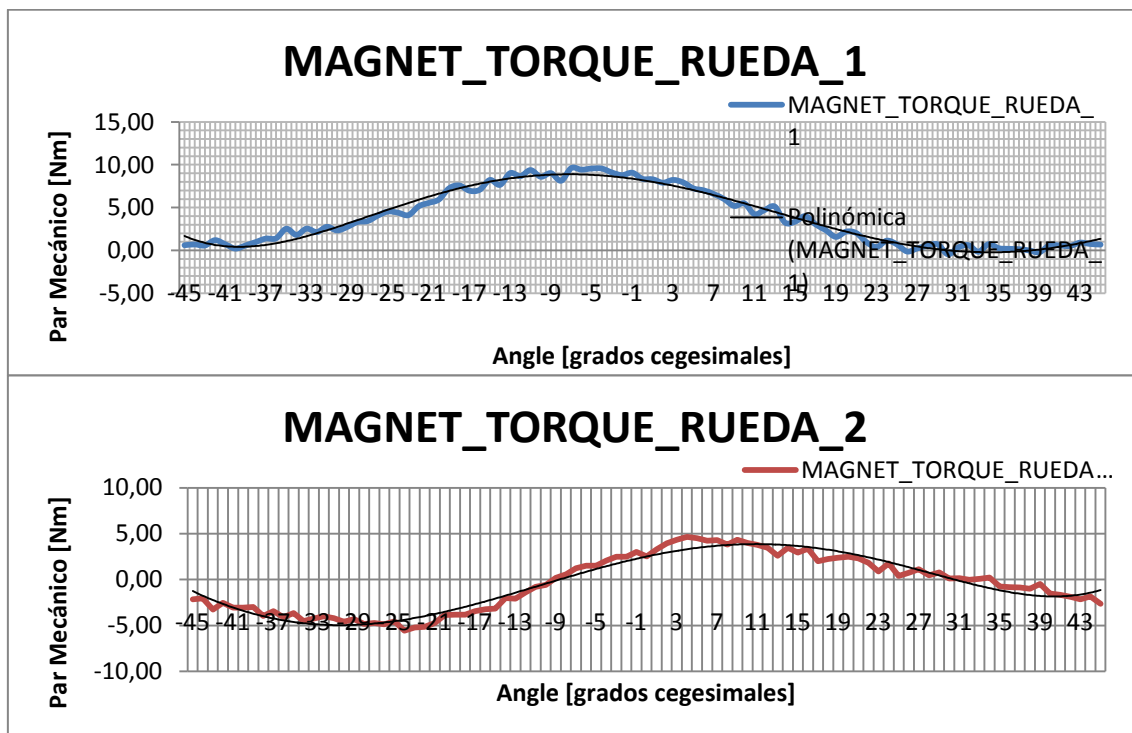
Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.7.2. Simulación del modelo para diferentes ángulos.

Los valores obtenidos de las simulaciones que a continuación se muestran se pueden consultar en el epígrafe 8.1.7 del anexo.

5.7.2.1. Simulación para $\beta=0$

Para esta simulación, se ha configurado el parámetro $\beta=0$, y por tanto las ruedas desfasadas un ángulo α determinado en función de la rueda antecesora (ver Figura 5.21); y se ha realizado el habitual barrido del parámetro “ANGLE” que permite obtener el par mecánico de cada rueda en todas las posiciones posibles durante un cuarto de circunferencia.





Estudio de optimización de un engranaje magnético

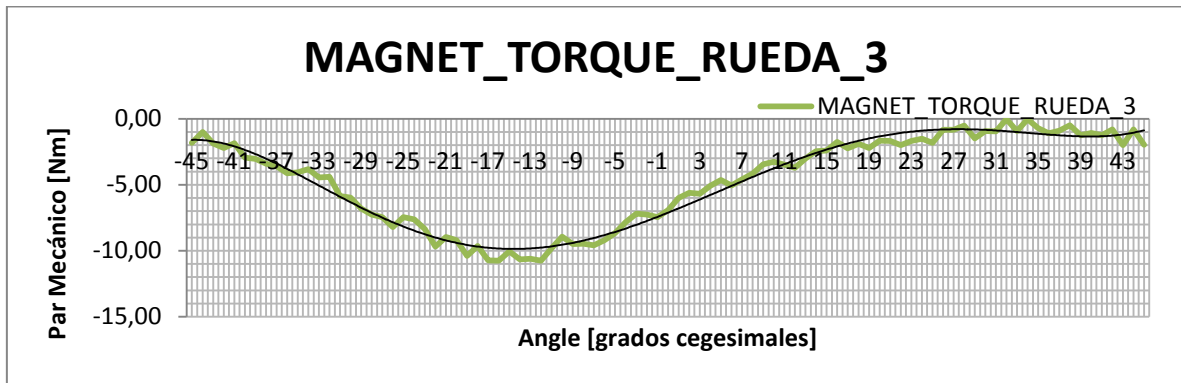


Figura 5.22: Gráfica del par magnético para cada eje por separado

Tras el análisis de los datos, se puede comprobar que el par obtenido en la Rueda_1, cuyo valor es siempre positivo en todo el rango de valores, indica que el par generado es antihorario y por lo tanto trata de girar en sentido contrario al impuesto por criterio. De esta forma, este par debe ser aportado por el motor para vencer esos esfuerzos y que el sistema comience a girar.

Para la Rueda_2 se observa que los valores fluctúan entre valores positivos y negativos, existiendo dos zonas en función de este criterio; una, en donde la rueda tratará de acelerarse por repulsión de los imanes, una vez haya superado la Rueda_2 el paso por el eje horizontal del sistema global, que lo hace para $\text{angle} = -10$, como se puede observar en la Figura 5.22; y por el contrario, para valores $\text{angle} < -10$, el arrastre de la rueda_3 por parte de la rueda_2 induce que sea necesario introducir un par en esta rueda para vencer el esfuerzo que le produce dicha rueda_3.

Por último, el comportamiento de la rueda_3 durante todo el intervalo es de valor negativo, y por tanto antihorario; con lo que se obtiene que dicha rueda siempre gire en el sentido de giro impuesto por el criterio de diseño.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

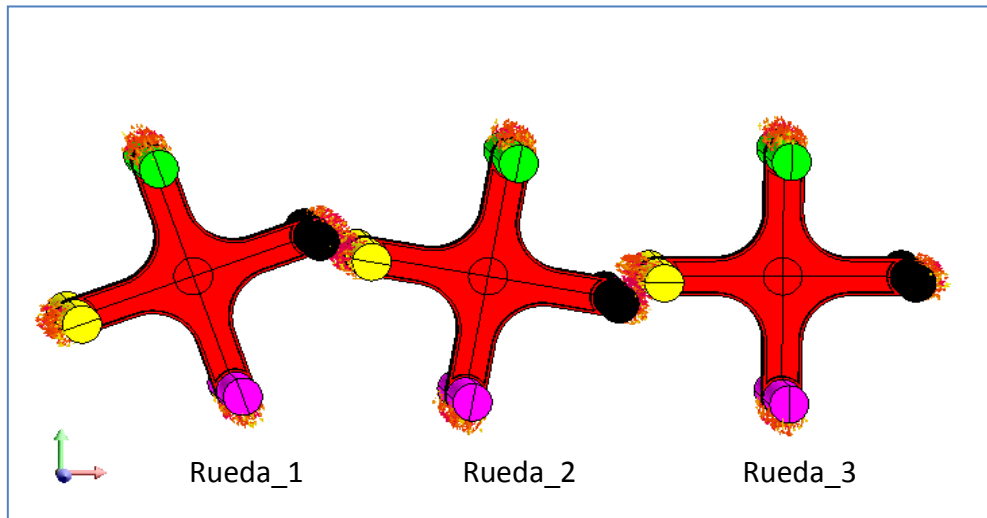


Figura 5.23: Detalle de efecto de repulsión para $\text{ANGLE} = -20$ grados

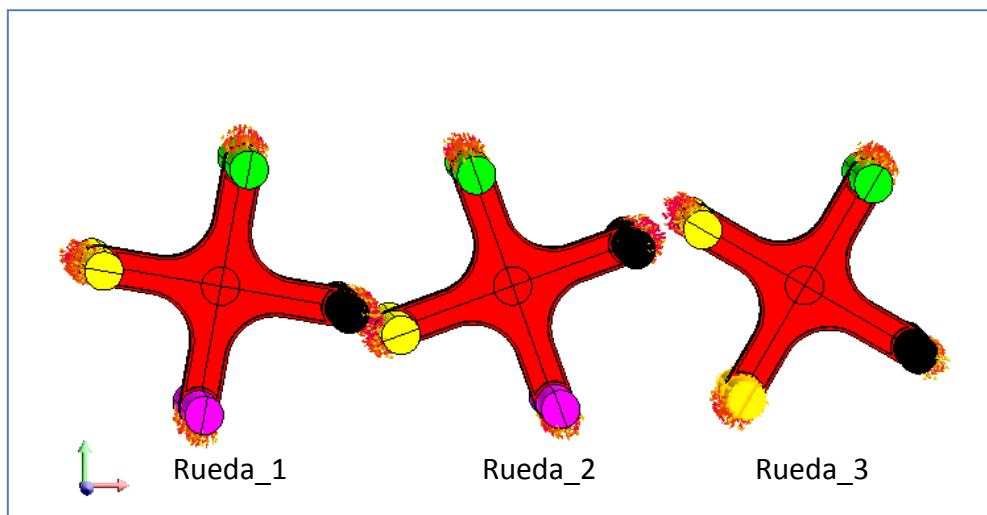


Figura 5.24: Detalle de efecto de repulsión para $\text{ANGLE} = 10$ grados

A continuación se muestra los resultados obtenidos



Estudio de optimización de un engranaje magnético

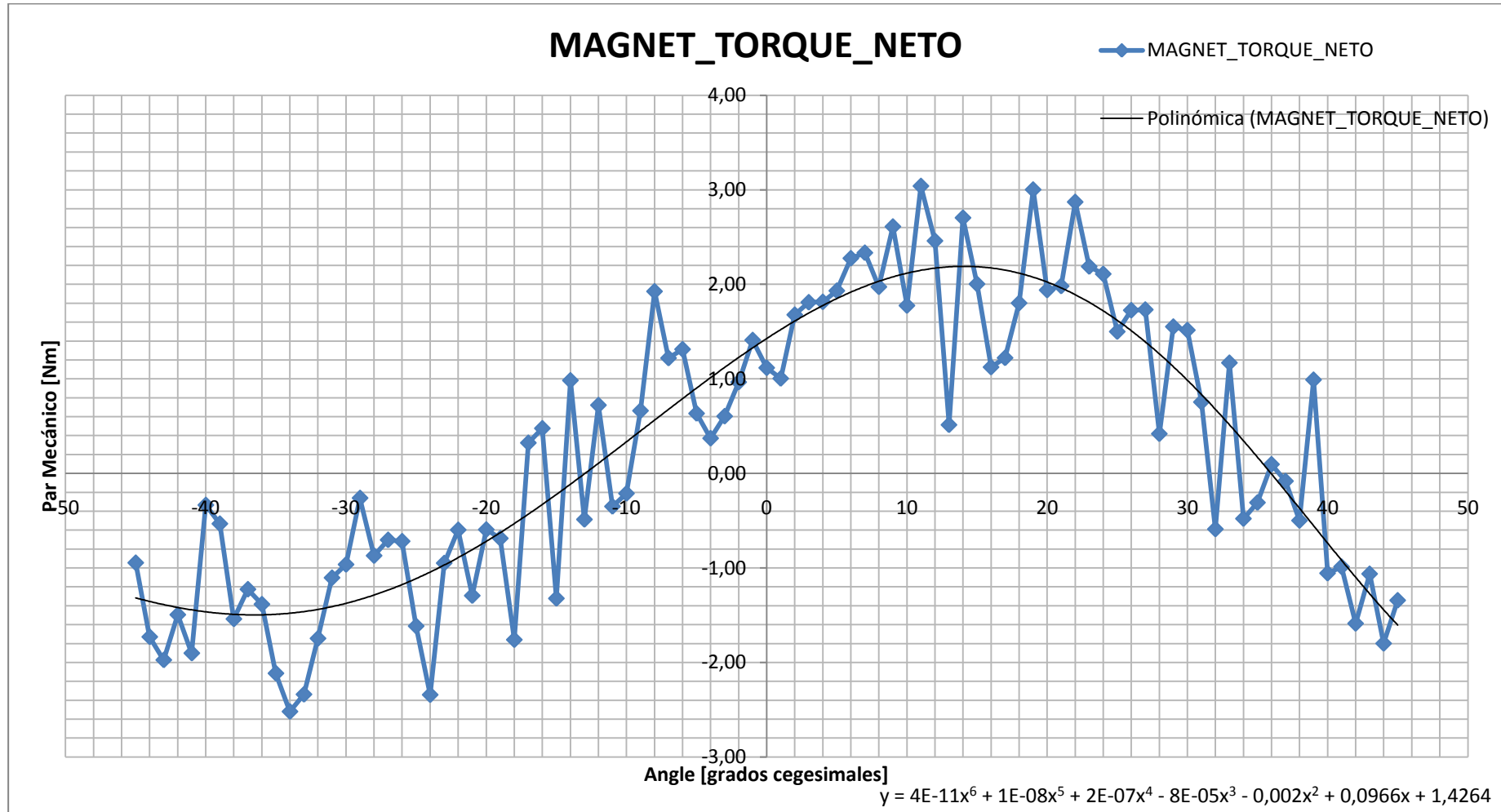


Figura 5.25: Gráfica del par magnético neto total para el modelo de 3 ruedas con $\beta=0$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Como se aprecia en la imagen se obtiene un intervalo de 40 grados desde $\text{ANGLE}=-10$ hasta $\text{ANGLE}=30$ según el sistema de coordenadas cartesiano global. Si se observa detenidamente, la grafica muestra que el sistema comienza a obtener pares netos positivos, cuando el ángulo de rotación del sistema de coordenadas local de la rueda_2 es positivo, que se produce para $\alpha=-10$ grados

5.7.2.2. Simulación del modelo para un ángulo $\beta=-15$ grados

Para esta nueva simulación, se ha modificado el parámetro $\beta=-15^\circ$ manteniéndose el resto de parámetros idénticos al caso anterior. Se pretende comprobar la variación que supone el cambio de valor de beta en la simulación del par mecánico neto.

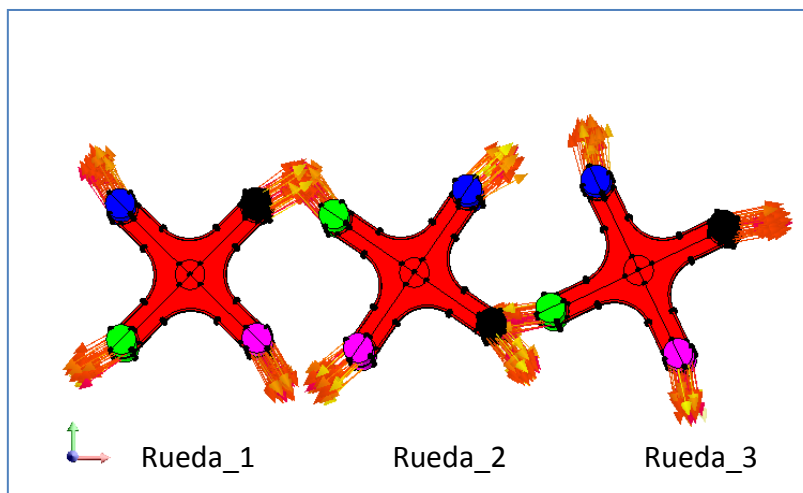


Figura 5.26: Detalle sobre la orientación $\beta=-15$ grados

En la se aprecia el modelo con las líneas de campo desviadas 15 grados respecto a su sistema de coordenadas local, debido al ángulo “beta”.

A continuación, se muestra la gráfica donde se muestra el resultado del par mecánico sobre cada eje de cada rueda



Estudio de optimización de un engranaje magnético

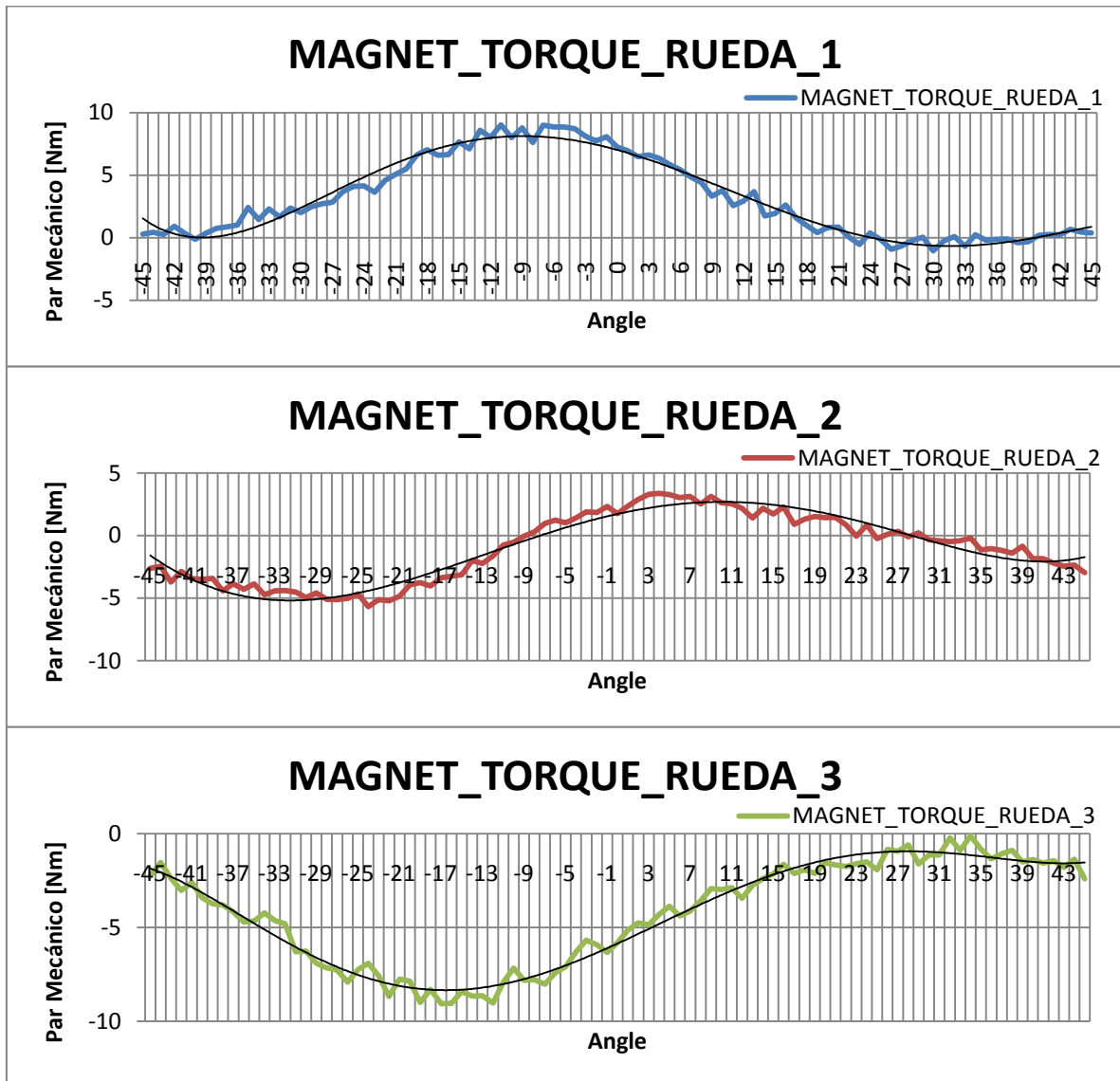


Figura 5.27: Gráfica del par mecánico en el eje de cada rueda para una orientación del campo de $\beta = -15$ grados

Se observa una tendencia en el comportamiento similar con las graficas anterior; algo lógico debido a la pequeña variación del ángulo “beta” ya que la interacción de los campos magnéticos sigue siendo importante. Se aprecian, valores ligeramente inferiores respecto al modelo de $\beta = 0$ (comparar con Figura 5.22) significativamente menores, sobre todo en los valores máximos; también existe una pequeña disminución en el rango de ángulos que permiten un par neto positivo, como se aprecia en la siguiente gráfica.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

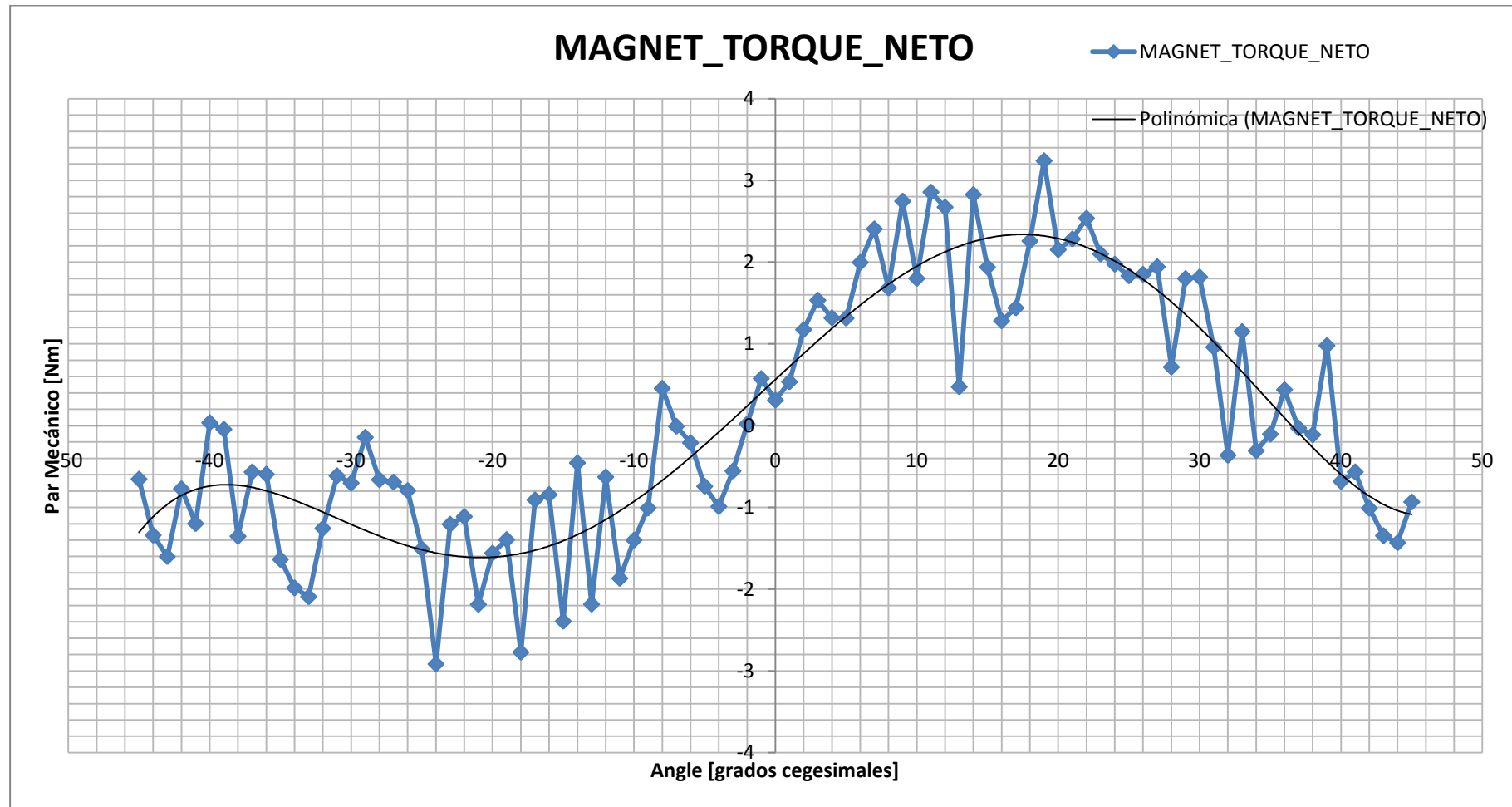


Figura 5.28: Gráfica del Par magnético neto total para el modelo de 3 ruedas con $\beta = -15$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Se observa cómo una pequeña variación del ángulo beta supone una pérdida en el intervalo de valores de “ANGLE” que obtiene pares netos positivos.

Por otro lado, se mantiene la forma de la curva prácticamente idéntica, como se puede observar en las gráficas los pares netos obtenidos son muy parecido en magnitud.

*** Se han realizado simulaciones para ángulos de beta=-30 grados y -45 grados pero no se han incluido en el documento al no mejorar los resultados obtenidos por ninguno de los modelos comentados anteriormente.*

5.8. Modelo de 2 ejes con 3 ruedas por eje

5.8.1. Evaluación del modelo

Este modelo surge como mejora al estudiado en el epígrafe 5.4 (ver página 59). En el modelo de partida eran dos ruedas alineadas con el sistema de coordenadas global y la distribución del campo era radial con un ángulo beta=0 grados. Las simulaciones realizadas mostraban un intervalo de 30 grados aproximadamente donde el comportamiento del sistema era el idóneo para nuestra aplicación.

Conocido que el modelo es aprovechable durante 30 grados, se trata de ubicar tres ruedas por eje decaladas 30 grados, de forma que sea posible asegurar que al menos un par de ruedas siempre estarán dentro del rango de valores que resulta positivo. Si el par mecánico generado por este par de ruedas es mayor que la influencia de las ruedas colindantes se obtendría que el comportamiento mejorara al modelo inicial.

Esta simulación se ha realizado, como ya es habitual, con el parámetro “ANGLE”, que permite obtener los pares mecánicos en los ejes de las ruedas en todas las posiciones. El barrido del parámetro ha sido modificado respecto a simulaciones



Estudio de optimización de un engranaje magnético

anteriores debido a que la simulación se ha corrido desde el valor inicial $ANGLE=0$ grados hasta $ANGLE=90$.

Para estudiar el modelo se han ideado dos situaciones diferentes que a continuación se detalla:

5.8.2. Simulaciones realizadas:

5.8.2.1. Modelo con $\alpha=0$ y $\beta=0$

Para llevar a cabo este modelo se ha orientado los imanes permanentes NdFeB de forma radial, y siempre en la dirección del brazo que los porta, con un ángulo de inclinación $\beta=0$ grados, ya que los ejes están alineados entre sí. De este modo se garantiza el comportamiento rueda a rueda más aprovechable que se había obtenido con anterioridad, tratando de estudiar ahora la influencia de otras ruedas en las proximidades.

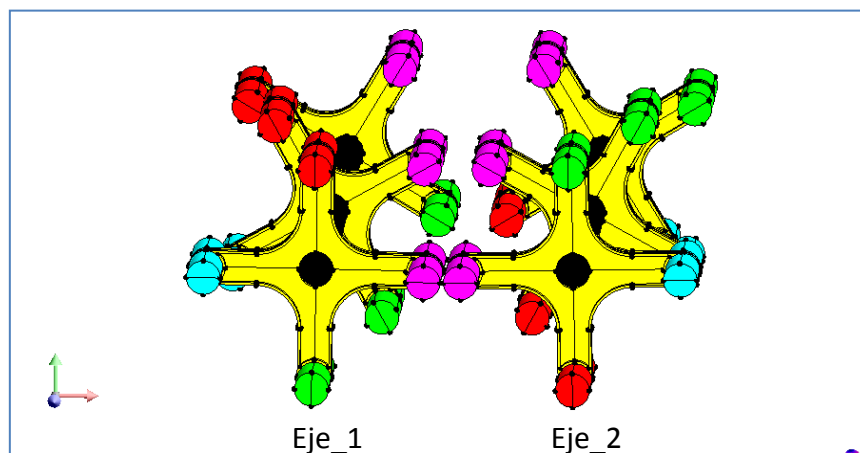


Figura 5.29: Modelo de 6 ruedas distribuidas en dos ejes alineados

A continuación se muestra el par mecánico de cada rueda y el par mecánico neto del sistema. Estos datos están disponibles en el epígrafe 8.1.8. del anexo por si quisieran ser consultados:



Estudio de optimización de un engranaje magnético

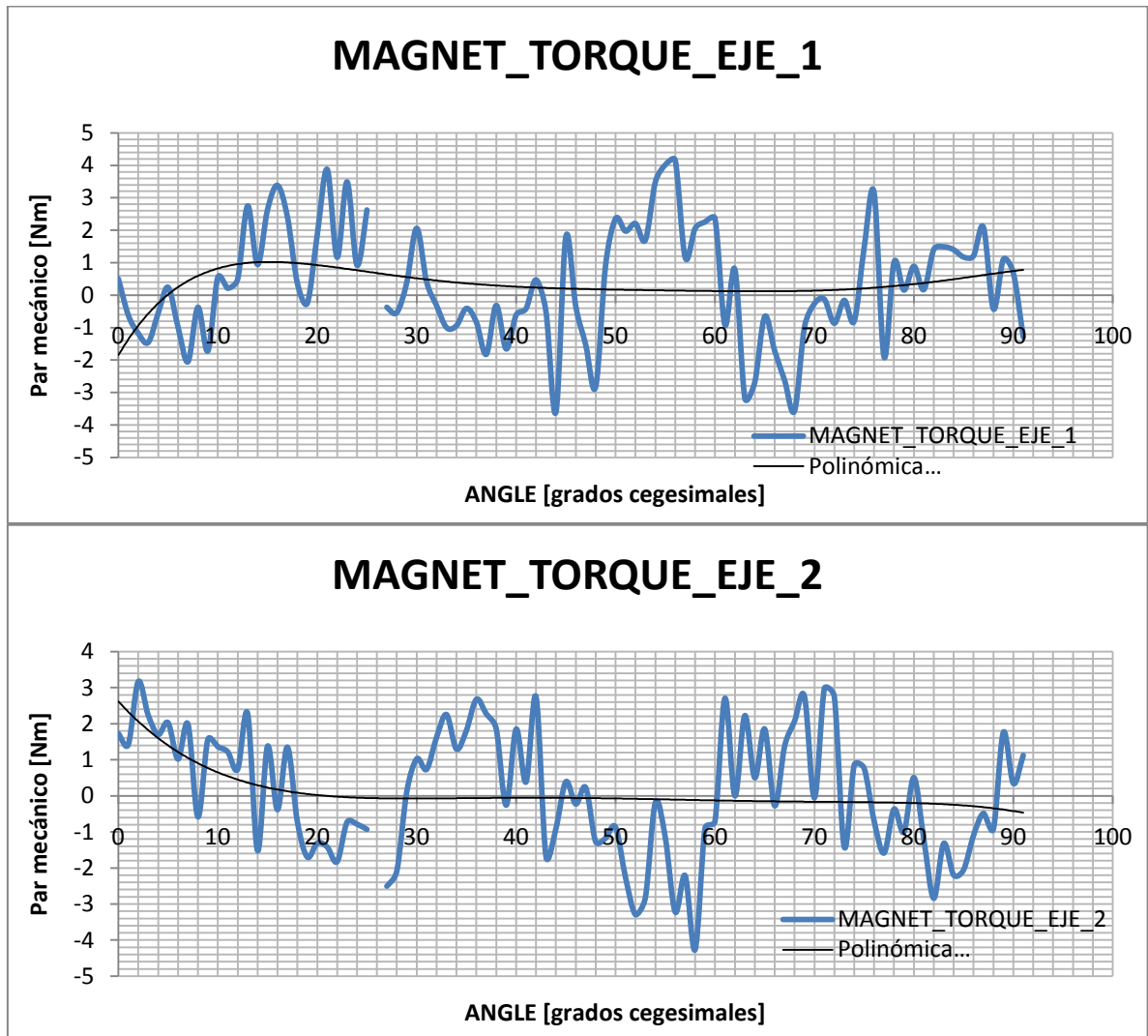


Figura 5.30: Gráfica del par mecánico de cada eje en el modelo de 3 ruedas por eje con $\beta=0$



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Par mecánico neto del modelo de 2 ejes con $\alpha=0$

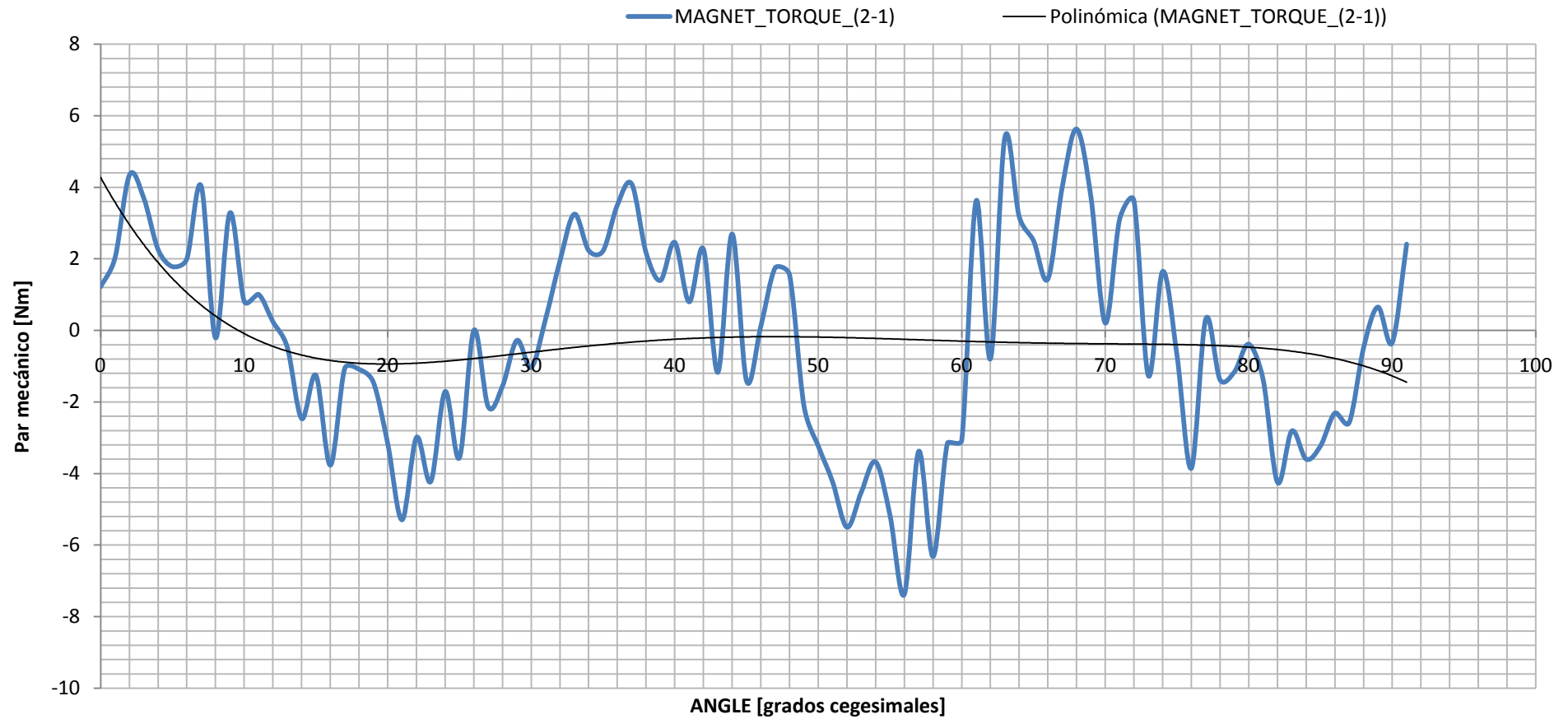


Figura 5.31: Gráfica del Par magnético neto total para el modelo de 3 ruedas por eje $\beta=0$



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Como se observa de la Figura 5.30 la línea de tendencia formada por los valores obtenidos de la simulación conforman una trayectoria cercana a cero, tanto en el par de cada eje como en el par neto del sistema, lo que concluye que esta configuración es no es adecuada para funcionar por su escaso rendimiento.

5.8.2.2. Modelo con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados

Para este modelo se ha particularizado la situación anterior variando α del EJE_2, de modo que vaya adelantado en un ángulo de 10 grados, puesto que giran todas las ruedas solidarias. De esta forma, se pretende eliminar el punto de incertidumbre producido cuando se orientan las ruedas en el eje horizontal en el cual se compensan las fuerzas.

Para este caso el uso de los imanes, se ha preferido dar una orientación de $\beta=15$ grados para garantizar siempre el enfrentamiento de los imanes, siempre Norte-Norte.

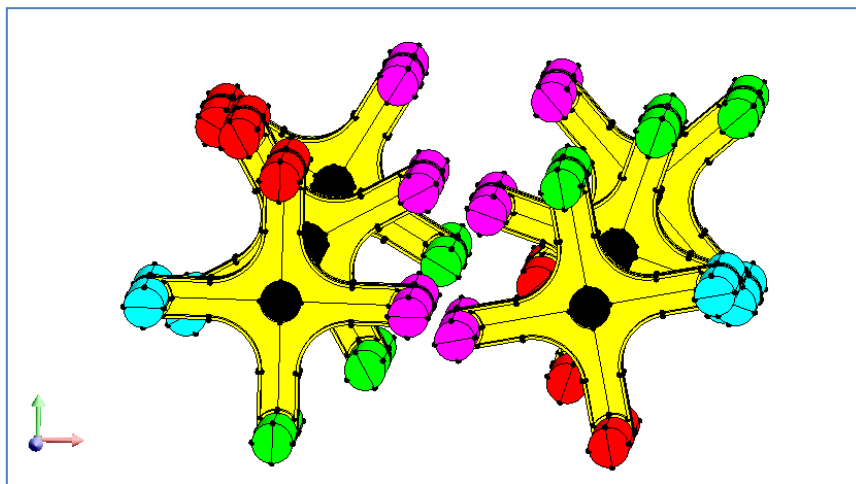


Figura 5.32: Modelo de 3 ruedas por eje decaladas 30 grados y teniendo el segundo eje un adelanto de 10 grados

A continuación se muestran los resultados de la simulación, en los cuales se ha calculado los pares de cada eje:



Estudio de optimización de un engranaje magnético

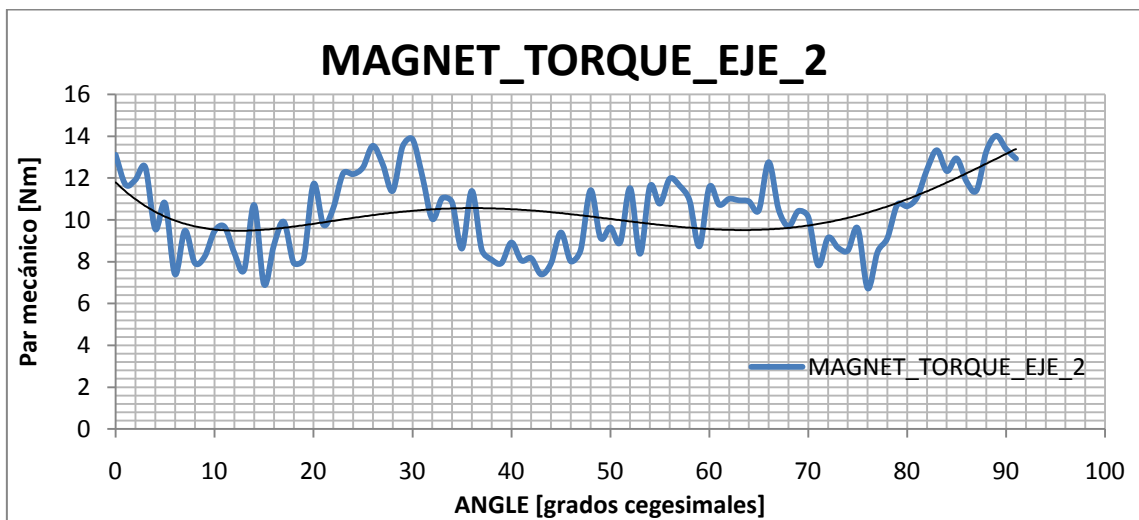
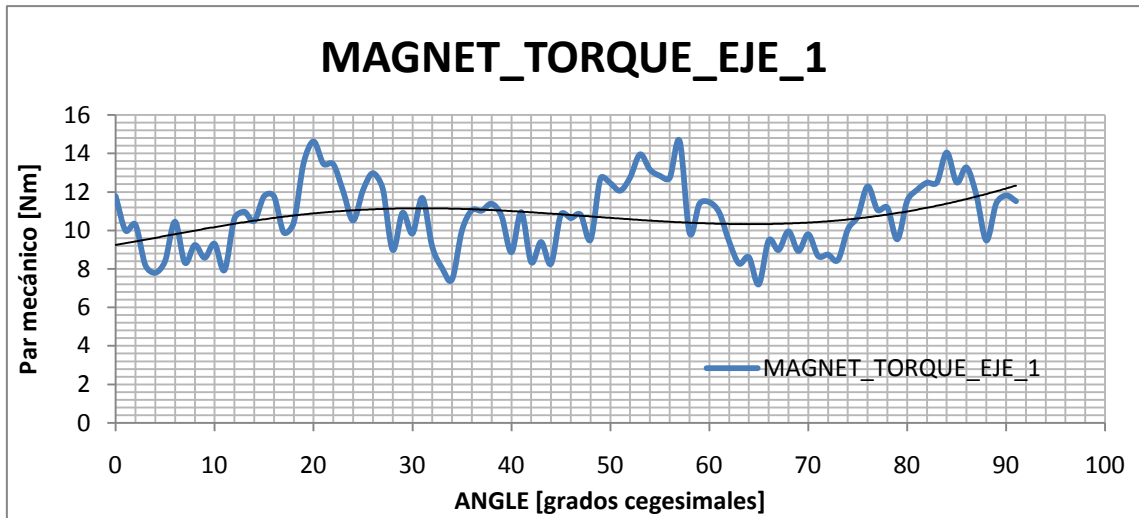


Figura 5.33: Gráfica del par mecánico de cada eje en el modelo de 3 ruedas por eje con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

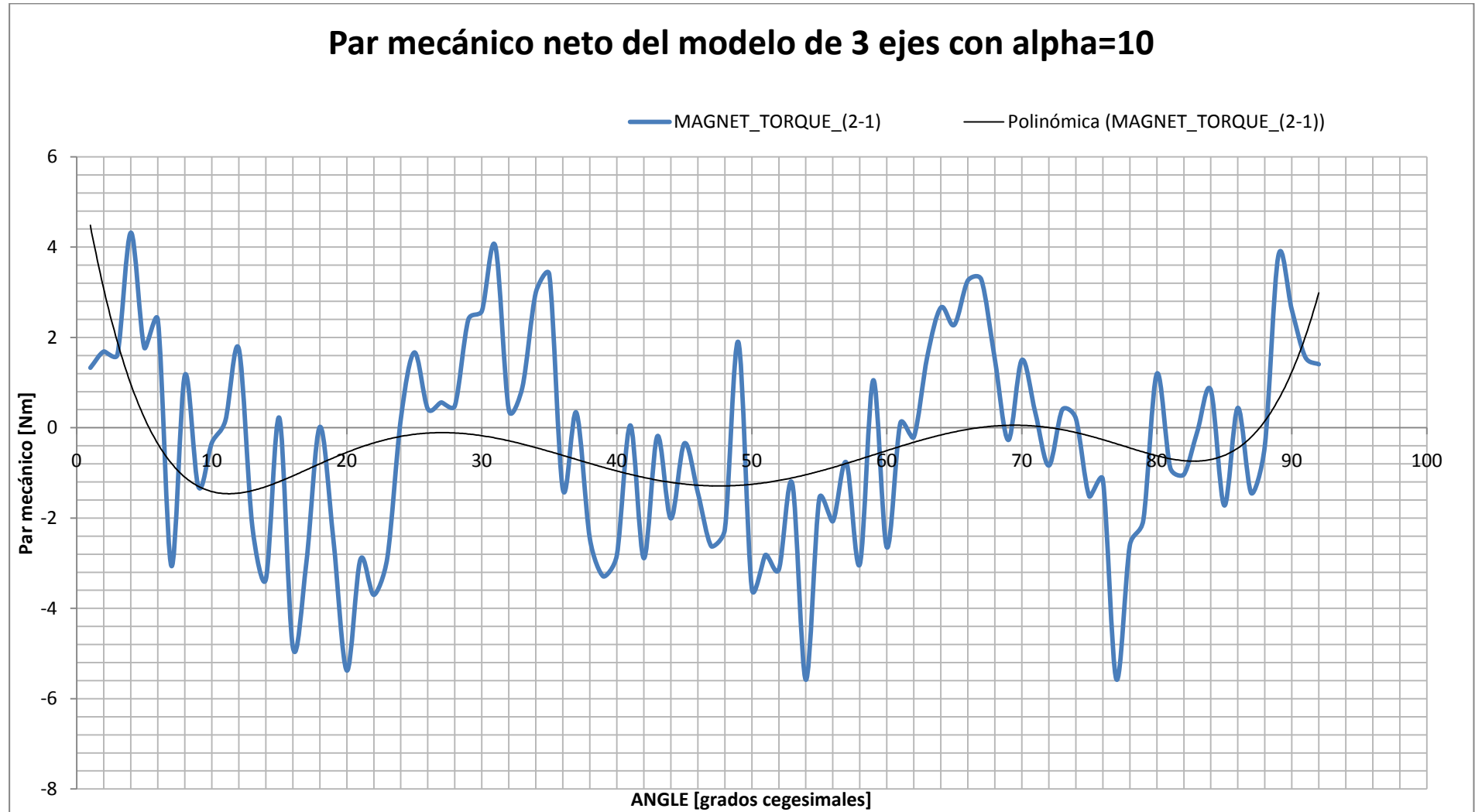


Figura 5.34: Gráfica del par magnético neto total para el modelo de 9 ruedas con el eje_2 adelantado 10 grados y $\beta=-1$



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.8.3. Conclusiones

Comparando las gráficas de las Figura 5.30 y Figura 5.33 se observa que la línea de tendencia se ha incrementado hasta llegar a un valor que fluctúa en torno a 10 Nm. Este resultado es muy bueno puesto que se obtienen pares prácticamente constante en valor sin fluctuaciones muy grandes lo que permite un control por parte del motor muy sencillo, y como se observa de la gráfica contenida en la Figura 5.34 el par neto es prácticamente nulo, lo que quiere decir que prácticamente el esfuerzo motor se transmite al otro eje, de modo que sería posible su funcionamiento como engranaje sin contacto físico.



5.9. Estudio de ruedas simples de 3, 4 y 5 imanes por soporte

5.9.1. Evaluación del modelo

Con este último estudio se pretende analizar la variación del número de imanes por rueda, para contrastar resultados y analizar cuál es el número exacto de imanes idóneo.

Se ha diseñado un modelo sencillo para poder realizar la simulación de una forma eficiente y rápida, con un menor número de puntos, líneas, caras y volúmenes, y por tanto de ecuaciones a resolver. Teniendo en cuenta que el soporte está formado por aluminio, éste no influye sobre el campo magnético generado por los imanes y por tanto, no influye en el resultado de la simulación la geometría del soporte.

Para la realización del soporte se ha mantenido constante el diámetro del soporte en 75 mm. De este modo es posible comparar los resultados que se obtienen debido a las interacciones de los imanes.

5.9.2. Simulaciones realizadas

Para la simulación, el barrido del parámetro “ANGLE” variará en función del número de imanes por rueda, del modo que se obtendrá con la siguiente fórmula:

$$ANGLE = \frac{360}{N^{\circ} \text{ de imanes}} \quad (14)$$

Los valores resultantes se han detallado en el epígrafe 8.1.9 y a continuación se muestran los valores agrupados en gráficas y sus tendencias para su intervalo “ANGLE” simulado.

5.9.2.1. Modelo 3 Imanes por soporte

En este primer modelo, se han colocado 3 imanes por rueda distanciados 120 grados, como se comprueba de la anterior fórmula. Se ha simulado todo el recorrido hasta que el siguiente imán según el sentido de giro alcance la posición horizontal en el



Estudio de optimización de un engranaje magnético

eje X, teniendo en cuenta el sentido de giro antihorario, como se aprecia en la Figura 5.35

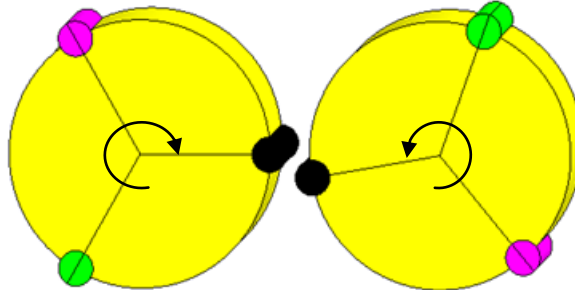


Figura 5.35: Modelo simplificado de 3 imanes por eje (instante Angle=0)

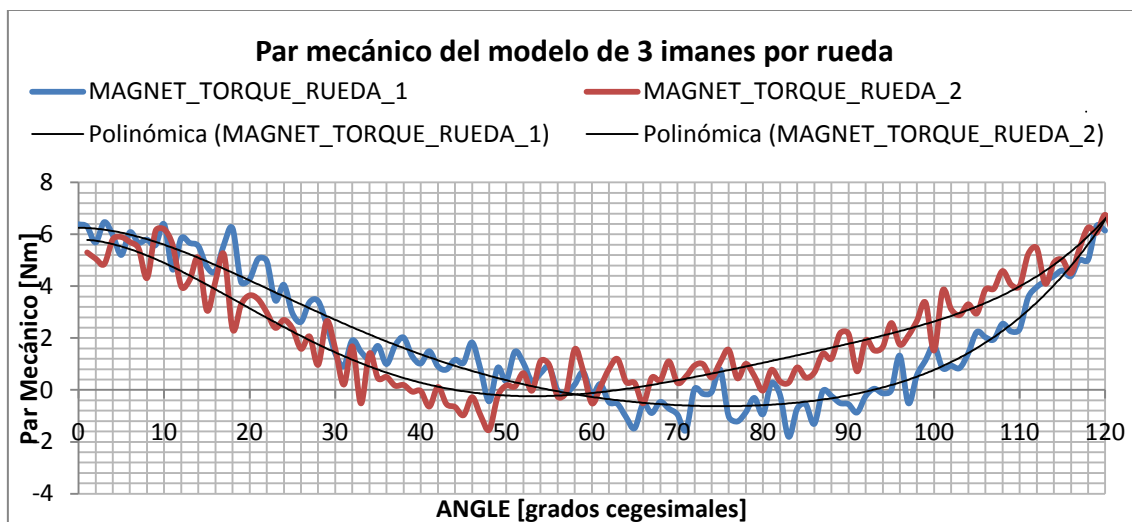


Figura 5.36 Gráfica del par mecánico para cada rueda de 3 imanes

Como se observa en esta gráfica el par mecánico obtenido en el eje es muy pequeño o prácticamente nulo para el intervalo donde más alejado se encuentra los imanes permanentes. Este intervalo está comprendido entre 30° y 90° aproximadamente, es decir durante 60 grados.

Por ello, se observa que este tipo de configuración, se verá sometida a menor repulsión debido al gran porcentaje de tiempo en el que las distancias son grandes y por tanto la repulsión de los imanes es mínima o nula.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

5.9.2.2. Modelo 4 Imanes por soporte

Para este modelo, se ha modificado el número de imanes por rueda, de modo que de la disposición de tres imanes como en el modelo anterior, se ha pasado a una disposición de 4 imanes.

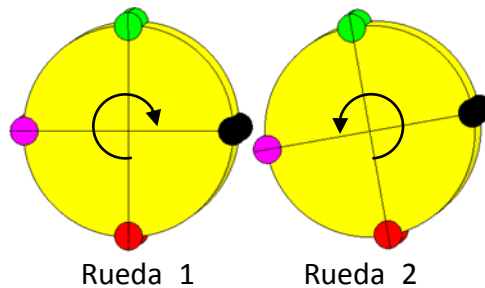


Figura 5.37: Modelo de 4 imanes por eje (instante Angle=0)

El modelo se ha simulado para todos los valores comprendidos desde el paso por el eje de abscisas de un imán (instante angle=0) hasta el paso por el mismo eje del siguiente imán según el sentido de giro adecuado (instante angle=90). Para la rueda 2, el funcionamiento es análogo puesto que rueda en sincronismo con 1, manteniendo siempre el ángulo de adelanto (alpha) de 10°.

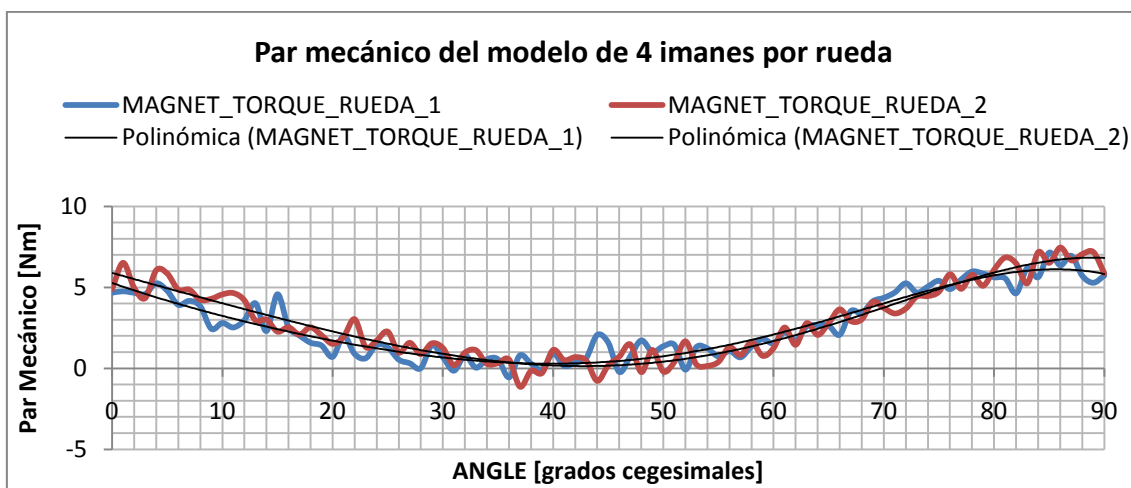


Figura 5.38 Gráfica del par mecánico para cada rueda de 4 imanes



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Como se observa en la gráfica, la introducción de un imán adicional, ha disminuido el intervalo de simulación puesto que al existir una geometría simétrica coincidente con los ejes del sistema de coordenadas cartesiano, el recorrido de giro de la rueda, es de 90 grados.

El resultado de la gráfica en comparación con la anterior, muestra una reducción en el intervalo donde los imanes no producían par debido al mayor número de imanes por rueda y destaca la coincidencia de ambas líneas de tendencia.

5.9.2.3. Modelo 5 Imanes por soporte

Tras los resultados obtenidos con el modelo de tres y cuatro imanes por rueda, se ha modificado el modelo para integrar 5 imanes por rueda.

De este modo, se sitúa un imán por cada 72 grados; la rueda recorre un menor ángulo desde que se alinea con el eje horizontal el imán 1 hasta que llega a esa posición el imán 2.

Es de esperar que si el ángulo que existe entre dos imanes de la misma rueda disminuye, el par mecánico generado en el eje obtenga mayores valores debido a la continua repulsión de sus imanes frente a los de la rueda colindante.

Por otro lado, la acción de introducir más imanes por soporte, posibilitará la interacción de varios conjuntos de imanes de modo simultaneo, puesto que existirá siempre al menos varios pares de imanes en posiciones cercanas, generando el consiguiente par mecánico; dicho par podría verse favorecido en unos caso siempre que la repulsión favorezca el sentido de movimiento deseado o penalizado, cuando la repulsión genere un par que se oponga en el sentido de giro.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

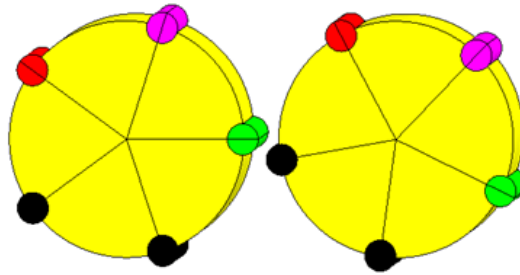


Figura 5.39: Modelo de 5 imanes por eje (instante Angle=0)

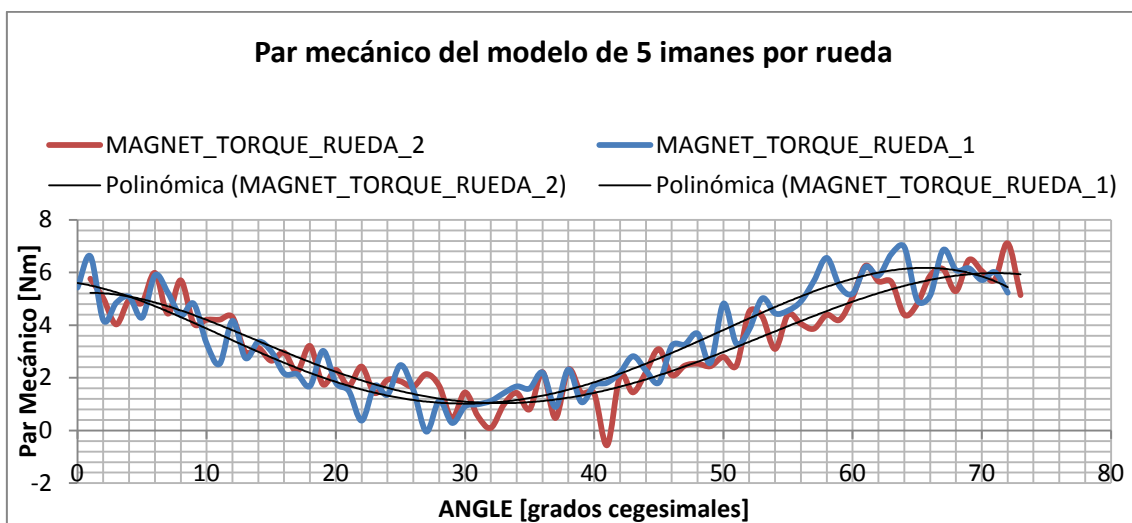


Figura 5.40 Gráfica del par mecánico para cada rueda de 5 imanes

De esta última simulación se puede destacar la diferencia entre los valores de par existentes entre el par de una rueda y la otra. Se ve en la gráfica que existe mayor diferencia entre el par de la rueda_1 y el par de la rueda_2 siendo mayor el par de la rueda_1 que supone un esfuerzo mayor por parte del motor, para obtener un resultado peor en la rueda inducida. Esto puede ser producido por la cercanía de los imanes colindantes que interfieren en los esfuerzos generados en el eje de la rueda y por tanto penaliza el comportamiento del sistema respecto al modelo de 4 imanes (ver Figura 5.38) donde se observa que las líneas de tendencia coinciden durante todo el recorrido de las ruedas.

Por tanto, se puede concluir que la elección inicial de un modelo de 4 imanes es el modelo más idóneo para este tipo de prototipo.



Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

En este proyecto se ha tratado de estudiar el comportamiento del modelo a través de elementos finitos, y a través de él, se han propuesto mejoras para la optimización de su funcionamiento.

Se han obviado simulaciones realizadas porque no aportaban ningún aspecto de interés de lo ya recogido en este documento o porque la modificación del parámetro no influía en el modelo como la variación de la longitud del brazo, realizándose simulaciones para longitudes de brazo de 60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120 mm.

El comportamiento del sistema se estima ideal puesto que no se han tenido en cuenta los efectos producidos por pérdidas debidas al rozamiento en los rodamientos ni por el efecto del aire.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Todos los modelos analizados han pretendido modificar o mejorar algún parámetro en particular. Las modificaciones aportadas han mejorado el funcionamiento del sistema, valorando la introducción de los imanes permanentes con dirección radial, como una mejora fundamental en el montaje, para obtener unos resultados más satisfactorios.

Las principales conclusiones obtenidas de este proyecto se enumeran a continuación:

- Se ha obtenido una mejora del comportamiento del dispositivo tras la modificación de la orientación del campo magnético pasando de una configuración axial a radial.
- Se ha comprobado mediante simulaciones que la fuerza en los imanes es inversamente proporcional a la distancia que los separa, como era de esperar.
- Se obtiene que el rango comprendido entre 0° a -15° grados es el más idóneo cuando se trata de una configuración radial.
- Mejora del comportamiento con un desfase en el giro de la rueda_2 que adelante a la rueda_1, obteniéndose un ángulo óptimo $\alpha=10$ grados.
- Se comprueba que el modelo de tres ruedas mejora el comportamiento con respecto a los modelos de dos ruedas para unos ángulos α en torno a 10 grados y β a -15 grados.
- Posible aplicación práctica del modelo de tres ruedas por eje decaladas 30 grados con disposición de 4 imanes por rueda, como engranaje magnético.

No obstante, con todos los resultados obtenidos, no se puede afirmar que el proyecto tenga viabilidad para funcionar como generador de energía puesto que como se ha afirmado antes, el modelo es ideal y los resultados que se han obtenido no permiten ser muy optimistas, puesto que no se han tenido en cuenta las pérdidas producidas en el sistema.



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Por todo, sería necesario realizar un estudio más pormenorizado teniendo en cuenta todos los aspectos que se incluyen en las futuras actuaciones de este trabajo.

6.2. Líneas Futuras

A continuación, se proponen posibles estudios que no han sido del alcance del proyecto y que podrían determinar de un modo inequívoco la viabilidad de este sistema para obtener energía:

- Se debería realizar un estudio mecánico que analizase las fuerzas generadas en las piezas mecánicas para dimensionar los materiales y las geometrías de las piezas, para delimitar el tamaño del modelo. Sería interesante realizar estudios con software de elementos finito.
- Sería interesante poder analizar el comportamiento dinámico del modelo que debido al software de modulo del software de elementos finitos utilizado no se ha podido estudiar. Es fundamental analizar el comportamiento teniendo en cuenta variables dinámicas, tales como la inercia, o la fuerza de resistencia que ofrece el aire que circunvala al modelo, puesto que opone una resistencia al giro y que en este proyecto no ha sido tomada en cuenta.
- Sería interesante conocer cómo se comporta el modelo cuando se le acople un motor eléctrico o dínamo capaz de recuperar la energía aportada al sistema. El hecho de tener una fuerza de oposición que impide el movimiento modificará el funcionamiento del modelo, pudiendo llegar al caso extremo en el que el eje quede bloqueado y por tanto, pierda el sincronismo todo el modelo, condición necesaria de evaluar para poder evitarla.
- Por último, sería interesante indagar sobre otras topologías diferentes y otras disposiciones geométricas de los imanes que pudieran realizar un movimiento de modo más continuado, valorándose la posibilidad de implementar volantes



Estudio de optimización de un engranaje magnético

de inercia. Otro aspecto destacable para estudiar, sería la posibilidad de sustituir los imanes utilizados por otros de mayor flujo magnético.



Capítulo 7

Bibliografía

- [1] LEONIDAS, V; “Finite Element Method Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications”. *IEEE computer Society Press*
- [2] SANZ FEITO, J; “Máquinas eléctricas”. Madrid: *Pearson Educación*, 2002
- [3] FRAILE MORA, J. “Máquinas Eléctricas”, 5a ed. Madrid: *Mc Graw Hill*, 2003
- [4] BANSAL, R. “Fundamentals of Engineering Electromagnetics”. *Taylor & Francis*, 2004.
- [5] GIERAS, J.F.; WING, M. “Permanent magnet motor technology: Design and applications”, 2a ed. Suiza: *Marcel Dekker*, 2002
- [6] ALLAG, H.; YONNET, J-P. LATRECHE, M.E.H. “3D Analytical Calculation of Forces between Linear Halbach-Type Permanent-Magnet Arrays”. France: EPE Chapter “Electric drives” *Joint Symposium*
- [7] ROVERS, J.M.M.; JANSEN, J.W.; LOMONOVA, E. A. y RONDE, M. J. C. “Calculation of the Static Forces Among the Permanent Magnets in a Halbach Array”. *IEEE Transactions on Magnetism*, VOL.45



Estudio de optimización de un engranaje magnético

[8] FURR, D, "Motor Perendev" Video disponible en:

<http://www.motormagnetico.org/2008/11/21/replica-de-motor-perendev-por-bedini/>>

[9] "Imanes permanentes", Enciclopedia libre Wikipedia <http://wikipedia.org>

[10] FLUX 10. "2D Application. Brushless DC Motor: Constructing the Model"
(2005)

[11] FLUX 10. "2D Application: Brushless DC Motor: Calculations"

[12] FLUX 9.10. "2D Application: Tutorial of electrostatics" (Enero 2005)

[13] FLUX 9.10. "2D Application: Tutorial of magnetostatics" (Diciembre 2004)

[14] FLUX 10. "2D Application: Synchronous motor: Technical paper" (Abril 2006)

[15] FLUX 9.10. "2D Application: Tutorial of translating motion" (Enero 2005)

[16] FLUX 10. "3D application: Tutorial of magnetostatics". (Junio 2007)

[17] FLUX 10. "3D application: Rotation motion tutorial". (Junio 2007)

[18] FLUX 10. "3D Application: Generic tutorial of geometry and mesh". (Junio 2007)

[19] FLUX 8.10. "3D Application: Permanent magnet machine, technical paper".
(Mayo 2004)



Estudio de optimización de un engranaje magnético

Capítulo 8

Anexos

8.1. Tablas obtenidas de las simulaciones.

8.2. Planos



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1. Tablas obtenidas de las simulaciones

8.1.1. Datos del modelo propuesto inicialmente

ANGLE	MAGNET_TORQUE_LEFT	MAGNET_TORQUE_RIGHT	MAGNET_TORQUE_(2-1)
0	-0,1446	0,0493	0,1938
1	0,2361	-0,2488	-0,4848
2	0,1990	0,0610	-0,1380
3	-0,1390	-0,2676	-0,1287
4	0,2888	-0,0149	-0,3037
5	-0,0535	-0,2199	-0,1664
6	-0,1270	-0,3899	-0,2629
7	0,0327	-0,2266	-0,2593
8	-0,2146	-0,0052	0,2094
9	0,0805	0,0092	-0,0712
10	-0,1481	-0,1286	0,0195
11	0,1849	0,0445	-0,1404
12	-0,1337	-0,2385	-0,1049
13	0,1095	0,0528	-0,0567
14	0,0183	-0,0397	-0,0580
15	-0,2036	0,0288	0,2324
16	-0,0429	-0,2826	-0,2397
17	0,1686	-0,1844	-0,3530
18	0,0156	0,0313	0,0157
19	0,1067	0,0493	-0,0574
20	-0,0293	0,1826	0,2119
21	0,1756	-0,2147	-0,3903
22	-0,0076	0,1455	0,1531
23	-0,0611	0,2190	0,2801
24	-0,2804	-0,1174	0,1630
25	0,3163	0,3046	-0,0117
26	-0,0984	-0,1319	-0,0335
27	0,0950	-0,2701	-0,3652
28	0,2525	-0,0723	-0,3248
29	-0,0689	0,1025	0,1715
30	-0,2157	-0,4128	-0,1971
31	-0,0705	-0,3360	-0,2656
32	0,0886	-0,2628	-0,3514
33	-0,3018	0,1715	0,4732
34	-0,1299	0,1792	0,3091
35	0,1915	0,0713	-0,1202



Estudio de optimización de un engranaje magnético

36	-0,0961	-0,2674	-0,1713
37	0,1471	0,1226	-0,0246
38	0,0368	-0,0706	-0,1074
39	0,0595	-0,1600	-0,2195
40	0,2823	-0,0538	-0,3360
41	-0,1506	0,0064	0,1569
42	-0,1720	-0,1050	0,0670
43	0,1095	0,0024	-0,1071
44	0,0270	-0,1140	-0,1409
45	0,0948	-0,1735	-0,2683
46	-0,1255	-0,0462	0,0792
47	-0,0840	-0,0168	0,0673
48	-0,0135	-0,2515	-0,2380
49	-0,0036	0,0108	0,0144
50	0,0681	-0,1485	-0,2166
51	-0,0260	-0,0939	-0,0679
52	0,0482	-0,0173	-0,0655
53	0,1852	-0,0750	-0,2601
54	-0,0749	0,0420	0,1169
55	0,2210	-0,2485	-0,4695
56	-0,1515	-0,0317	0,1198
57	-0,1625	-0,0203	0,1422
58	-0,2214	0,1425	0,3639
59	0,1980	-0,3822	-0,5803
60	0,2863	0,0407	-0,2456
61	-0,0855	-0,0361	0,0494
62	-0,0719	0,2071	0,2790
63	0,0285	0,2245	0,1960
64	0,0106	-0,1680	-0,1786
65	-0,1305	-0,2235	-0,0930
66	-0,1122	-0,1909	-0,0787
67	-0,1315	-0,1550	-0,0235
68	-0,2730	-0,0420	0,2310
69	-0,3443	-0,0674	0,2770
70	0,1686	0,1776	0,0091
71	-0,1434	0,1220	0,2654
72	0,1374	0,0083	-0,1291
73	-0,2803	-0,2290	0,0514
74	0,0727	-0,2795	-0,3523
75	0,0998	-0,1904	-0,2902
76	0,0324	-0,0046	-0,0369
77	0,0616	-0,1046	-0,1662



Estudio de optimización de un engranaje magnético

78	-0,1453	-0,3251	-0,1797
79	-0,1817	-0,1863	-0,0047
80	0,1361	-0,0216	-0,1577
81	-0,1444	-0,0904	0,0540
82	-0,1600	-0,0199	0,1401
83	0,0115	0,0054	-0,0061
84	-0,0863	-0,0956	-0,0093
85	-0,1092	0,0194	0,1286
86	0,0169	0,2873	0,2704
87	-0,0076	0,0016	0,0092
88	0,0816	0,0767	-0,0049
89	-0,0511	0,0638	0,1149

Tabla 8.1: Valores obtenidos del modelo inicial



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.2. Datos obtenidos de la variación de la rueda_2 respecto a la rueda_1 a través del parámetro “alpha”

8.1.2.1. Datos referentes a alpha=0 grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_RUEDA(2-1)
-45	0,0628	-0,0376	-0,1004
-44	-0,0446	0,1161	0,1607
-43	-0,0914	0,0404	0,1318
-42	-0,5080	0,5789	1,0868
-41	-0,2748	-0,0830	0,1918
-40	-0,6785	0,1385	0,8170
-39	0,2061	0,3457	0,1396
-38	0,0490	0,3517	0,3028
-37	-0,4710	0,0516	0,5227
-36	0,1675	-0,1755	-0,3430
-35	-0,4780	0,2720	0,7501
-34	-0,1968	0,2595	0,4563
-33	-0,0825	0,4918	0,5743
-32	-0,2947	0,0637	0,3584
-31	-0,0228	0,0442	0,0670
-30	-0,0726	0,0087	0,0813
-29	0,2771	0,0427	-0,2344
-28	0,2530	-0,1431	-0,3961
-27	0,2480	-0,2731	-0,5211
-26	0,3312	-0,2565	-0,5877
-25	0,3336	-0,1122	-0,4457
-24	0,3951	0,0581	-0,3370
-23	0,3647	-0,2390	-0,6036
-22	0,1532	-0,6630	-0,8162
-21	0,2433	-0,3173	-0,5606
-20	0,7337	-0,6769	-1,4106
-19	0,7814	-0,5602	-1,3416
-18	0,6808	-0,7409	-1,4218
-17	0,4852	-0,9137	-1,3988
-16	0,7388	-0,6235	-1,3624
-15	0,3777	-0,9803	-1,3579
-14	0,6444	-0,7356	-1,3800
-13	0,4744	-0,8798	-1,3542
-12	0,3453	-0,5464	-0,8917



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_RUEDA(2-1)
-11	0,5241	-0,5534	-1,0775
-10	0,4395	-0,6128	-1,0523
-9	0,4147	-0,4058	-0,8205
-8	0,7430	-0,5999	-1,3429
-7	0,7342	-0,5989	-1,3331
-6	0,7756	-0,6149	-1,3905
-5	0,2458	-0,5987	-0,8445
-4	0,7084	-0,2929	-1,0013
-3	0,3242	-0,2571	-0,5813
-2	0,3696	-0,1149	-0,4845
-1	0,1866	-0,3432	-0,5298
0	0,0590	-0,1705	-0,2296
1	-0,1379	0,0534	0,1913
2	-0,4723	0,4534	0,9257
3	-0,4913	0,6116	1,1029
4	-0,3617	0,3631	0,7248
5	-0,6262	0,0702	0,6965
6	-0,2482	0,3889	0,6372
7	-0,4425	0,3951	0,8376
8	-0,5981	0,1562	0,7543
9	-0,3821	0,2400	0,6221
10	-0,4668	0,5222	0,9890
11	-0,5741	0,5466	1,1206
12	-0,3138	0,5829	0,8968
13	-0,4730	0,3417	0,8147
14	-0,6148	0,3629	0,9777
15	-0,3455	0,4158	0,7613
16	-0,8332	0,3406	1,1738
17	-0,7279	0,3436	1,0715
18	-0,9375	0,4978	1,4353
19	-0,7008	0,4863	1,1871
20	-0,5448	0,4549	0,9998
21	-0,5503	0,5037	1,0540
22	-0,5414	0,4414	0,9828
23	-0,5491	0,3158	0,8649
24	-0,7019	0,2143	0,9162
25	-0,4626	0,4270	0,8896
26	-0,1629	0,3304	0,4933
27	-0,3876	0,2582	0,6458
28	-0,3549	0,1251	0,4800



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_RUEDA(2-1)
29	-0,4509	0,1926	0,6435
30	-0,0433	0,5915	0,6348
31	0,0053	0,2262	0,2209
32	-0,0590	-0,1585	-0,0995
33	0,3336	-0,1254	-0,4589
34	0,3361	-0,1428	-0,4789
35	0,2049	-0,2515	-0,4565
36	0,0723	0,0199	-0,0524
37	0,0409	-0,0291	-0,0701
38	0,3720	-0,2911	-0,6631
39	-0,3240	0,0959	0,4199
40	0,0430	0,0331	-0,0100
41	-0,0511	-0,0038	0,0474
42	0,3402	0,0590	-0,2811
43	0,1272	0,0254	-0,1018
44	0,0523	-0,1279	-0,1802
45	-0,0362	-0,2864	-0,2502

Tabla 8.2: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=0$ grados

8.1.2.2. Datos referentes a $\alpha=10$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	0,2213	0,1980	-0,0233
-44	0,0325	0,2054	0,1729
-43	0,1767	0,3304	0,1538
-42	-0,2765	0,4350	0,7114
-41	-0,4050	0,6710	1,0760
-40	0,1391	0,4333	0,2943
-39	-0,0418	0,1855	0,2272
-38	0,1243	0,4419	0,3176
-37	-0,2388	0,3365	0,5753
-36	0,0502	0,5482	0,4981
-35	0,1233	0,2563	0,1330
-34	0,3045	0,1626	-0,1420
-33	0,4052	0,0086	-0,3965
-32	0,1605	-0,1326	-0,2931
-31	0,4032	0,0460	-0,3572



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-30	0,2843	0,0338	-0,2505
-29	0,7201	-0,6520	-1,3721
-28	0,6614	-0,1949	-0,8563
-27	0,9274	-0,0817	-1,0091
-26	0,6015	-0,3658	-0,9673
-25	1,0091	-0,2485	-1,2576
-24	1,2508	-0,0727	-1,3235
-23	1,1527	-0,4236	-1,5763
-22	1,3004	-0,3048	-1,6052
-21	1,4166	-0,1407	-1,5573
-20	1,3917	0,3541	-1,0376
-19	1,6407	0,0511	-1,5897
-18	1,5468	0,2688	-1,2780
-17	1,5053	0,3873	-1,1180
-16	1,5803	0,3551	-1,2251
-15	1,2809	0,5375	-0,7434
-14	1,6676	0,5626	-1,1051
-13	1,5484	0,9621	-0,5863
-12	1,8181	1,3654	-0,4527
-11	1,9290	1,0828	-0,8463
-10	1,7610	1,0056	-0,7553
-9	2,0745	1,1977	-0,8768
-8	1,6794	1,5449	-0,1345
-7	1,9413	1,4825	-0,4588
-6	1,7830	1,4110	-0,3720
-5	1,6661	1,2913	-0,3749
-4	1,5777	1,4514	-0,1263
-3	1,7808	1,4343	-0,3465
-2	1,3112	1,4902	0,1790
-1	1,0663	1,7437	0,6774
0	0,9125	1,3617	0,4492
1	1,0581	1,3316	0,2734
2	0,7323	1,7024	0,9701
3	0,9187	1,4807	0,5619
4	0,3947	1,1818	0,7870
5	0,4424	1,5068	1,0645
6	0,5784	1,5763	0,9978
7	-0,0061	1,4488	1,4549
8	0,6807	1,4412	0,7604
9	0,3502	1,1568	0,8067



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
10	-0,1474	1,1841	1,3315
11	-0,1144	1,1909	1,3053
12	0,0064	0,9423	0,9359
13	0,1277	1,0470	0,9192
14	0,1200	0,9189	0,7989
15	-0,2109	0,9120	1,1229
16	-0,2465	0,8949	1,1414
17	-0,2958	0,5859	0,8817
18	-0,2233	0,7185	0,9418
19	0,0595	0,3766	0,3171
20	-0,3428	0,6352	0,9780
21	-0,2933	0,2077	0,5011
22	0,1387	0,3771	0,2384
23	-0,1480	0,1711	0,3191
24	-0,3775	0,2375	0,6150
25	-0,2047	0,2544	0,4591
26	-0,1595	0,3718	0,5313
27	-0,2183	0,5355	0,7538
28	-0,2085	0,0514	0,2599
29	-0,1187	0,3019	0,4205
30	0,1167	0,0598	-0,0568
31	0,3434	0,1223	-0,2211
32	0,1886	0,4617	0,2731
33	0,2579	-0,1249	-0,3829
34	0,4799	0,1856	-0,2942
35	0,4865	0,0148	-0,4716
36	0,4736	0,1820	-0,2916
37	0,4178	0,4343	0,0166
38	0,2697	0,2886	0,0189
39	0,1717	0,3809	0,2092
40	0,1367	0,6448	0,5081
41	0,5791	0,6179	0,0388
42	0,3291	0,2557	-0,0734
43	0,5340	0,2733	-0,2607
44	0,0967	0,4754	0,3787
45	0,3057	0,3839	0,0782

Tabla 8.3: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=10$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

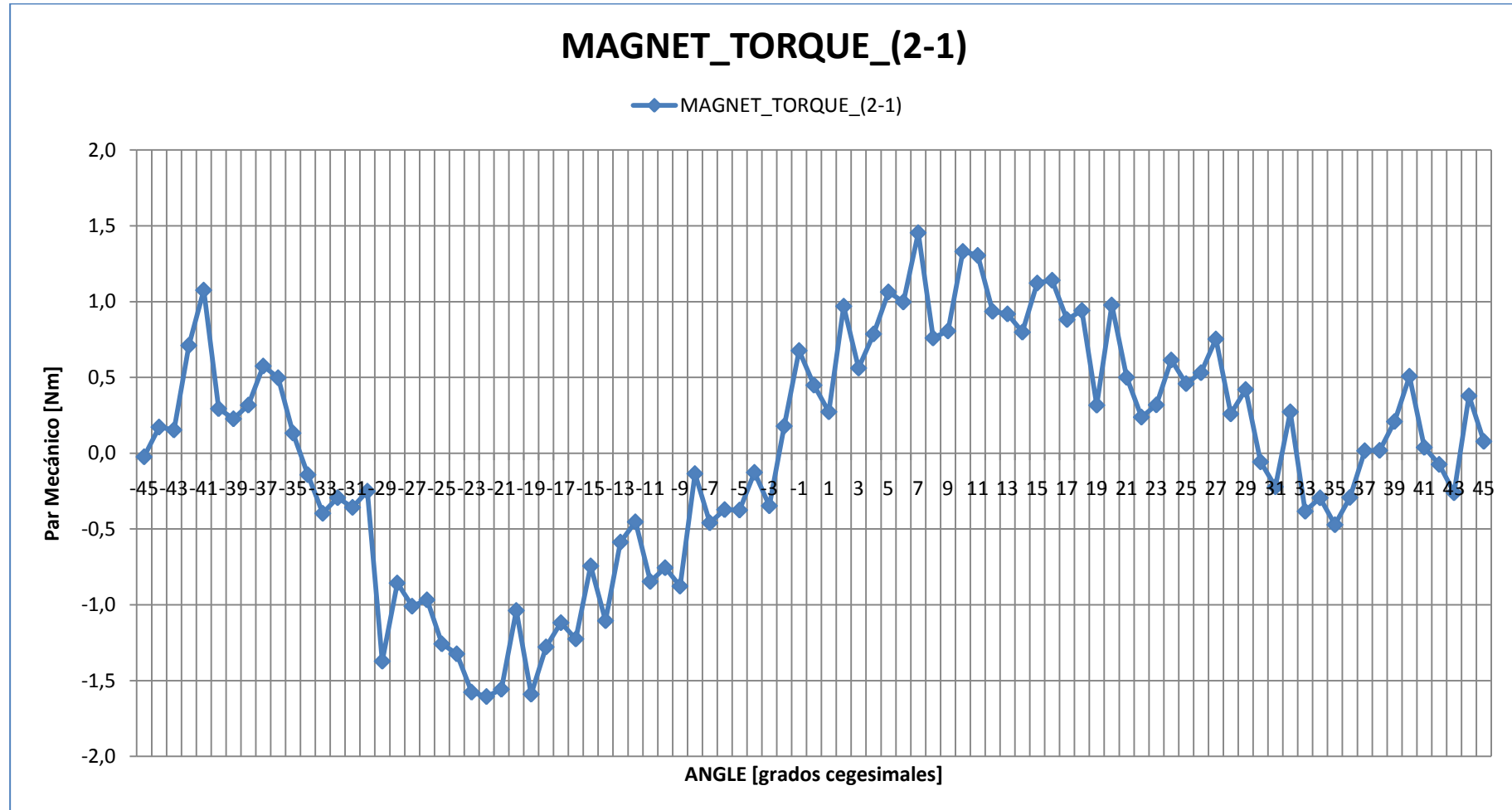


Figura 8.1: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=10$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.2.3. Datos referentes a $\alpha=20$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	0,2525	0,4042	0,1516
-44	0,2521	0,5424	0,2903
-43	0,1273	0,2077	0,0803
-42	0,2592	0,2074	-0,0519
-41	0,5057	0,4904	-0,0153
-40	0,4089	0,1213	-0,2876
-39	0,4329	0,0420	-0,3909
-38	0,2698	0,0006	-0,2692
-37	0,3316	0,1040	-0,2276
-36	0,3004	0,0147	-0,2857
-35	0,5179	0,0486	-0,4693
-34	0,3720	0,2712	-0,1008
-33	0,7705	0,1025	-0,6680
-32	0,5699	0,0248	-0,5451
-31	0,5742	0,2361	-0,3381
-30	0,9580	0,1930	-0,7650
-29	0,7016	0,3010	-0,4005
-28	1,0075	0,3783	-0,6291
-27	1,1636	0,3882	-0,7754
-26	1,2044	0,5417	-0,6627
-25	1,4810	0,4572	-1,0238
-24	1,8507	0,8313	-1,0195
-23	1,2013	0,7986	-0,4027
-22	1,4687	1,2448	-0,2239
-21	1,6667	1,1458	-0,5209
-20	1,9162	1,1990	-0,7172
-19	1,4103	1,4486	0,0383
-18	1,6649	1,4904	-0,1745
-17	1,7111	1,2894	-0,4217
-16	1,6998	1,3918	-0,3080
-15	1,5241	1,4331	-0,0910
-14	1,9014	1,6160	-0,2854
-13	1,7858	1,5831	-0,2027
-12	1,6398	1,8010	0,1612
-11	1,7004	1,9037	0,2033
-10	1,6346	1,8642	0,2296
-9	1,9540	1,6677	-0,2863
-8	1,7436	1,9636	0,2200



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-7	1,7571	1,8766	0,1195
-6	1,6279	1,7413	0,1134
-5	1,3163	1,4412	0,1248
-4	1,6920	1,6479	-0,0442
-3	1,1267	1,4209	0,2942
-2	1,2493	1,3230	0,0736
-1	1,0893	1,1737	0,0844
0	1,3004	1,3241	0,0237
1	0,8810	1,4713	0,5903
2	0,8788	1,1484	0,2696
3	0,8067	1,2238	0,4170
4	0,6052	1,3426	0,7375
5	0,5768	1,1138	0,5370
6	0,4061	0,9199	0,5138
7	0,4896	0,9561	0,4665
8	0,3124	0,9543	0,6419
9	0,3857	0,2227	-0,1630
10	0,2474	0,6331	0,3857
11	0,2029	0,4107	0,2078
12	0,2204	0,8541	0,6337
13	0,1504	0,4538	0,3035
14	-0,2419	0,3902	0,6321
15	-0,3147	0,5210	0,8357
16	0,1907	0,7625	0,5718
17	0,2042	0,4726	0,2684
18	0,2096	-0,0133	-0,2228
19	0,5552	0,5276	-0,0277
20	0,1999	0,4591	0,2591
21	0,3794	0,3543	-0,0250
22	0,2445	0,3356	0,0910
23	0,0835	0,0209	-0,0625
24	0,2903	0,2763	-0,0141
25	0,1236	0,5249	0,4013
26	0,2173	0,6800	0,4627
27	0,1944	0,6146	0,4202
28	-0,0302	0,4461	0,4763
29	0,2096	0,5374	0,3278
30	-0,1577	0,5933	0,7510
31	0,4082	0,6863	0,2781
32	0,0100	0,3309	0,3209



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
33	0,3958	0,3781	-0,0176
34	0,1329	0,9156	0,7828
35	0,3227	0,5923	0,2696
36	0,8613	0,2955	-0,5658
37	0,7152	0,7894	0,0742
38	0,4202	0,7649	0,3448
39	0,6542	0,5069	-0,1473
40	0,5783	0,1809	-0,3974
41	0,5827	0,5119	-0,0708
42	0,7026	0,8571	0,1545
43	0,6114	0,5004	-0,1109
44	0,3796	0,4327	0,0531
45	0,3758	0,3049	-0,0709

Tabla 8.4: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=20$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

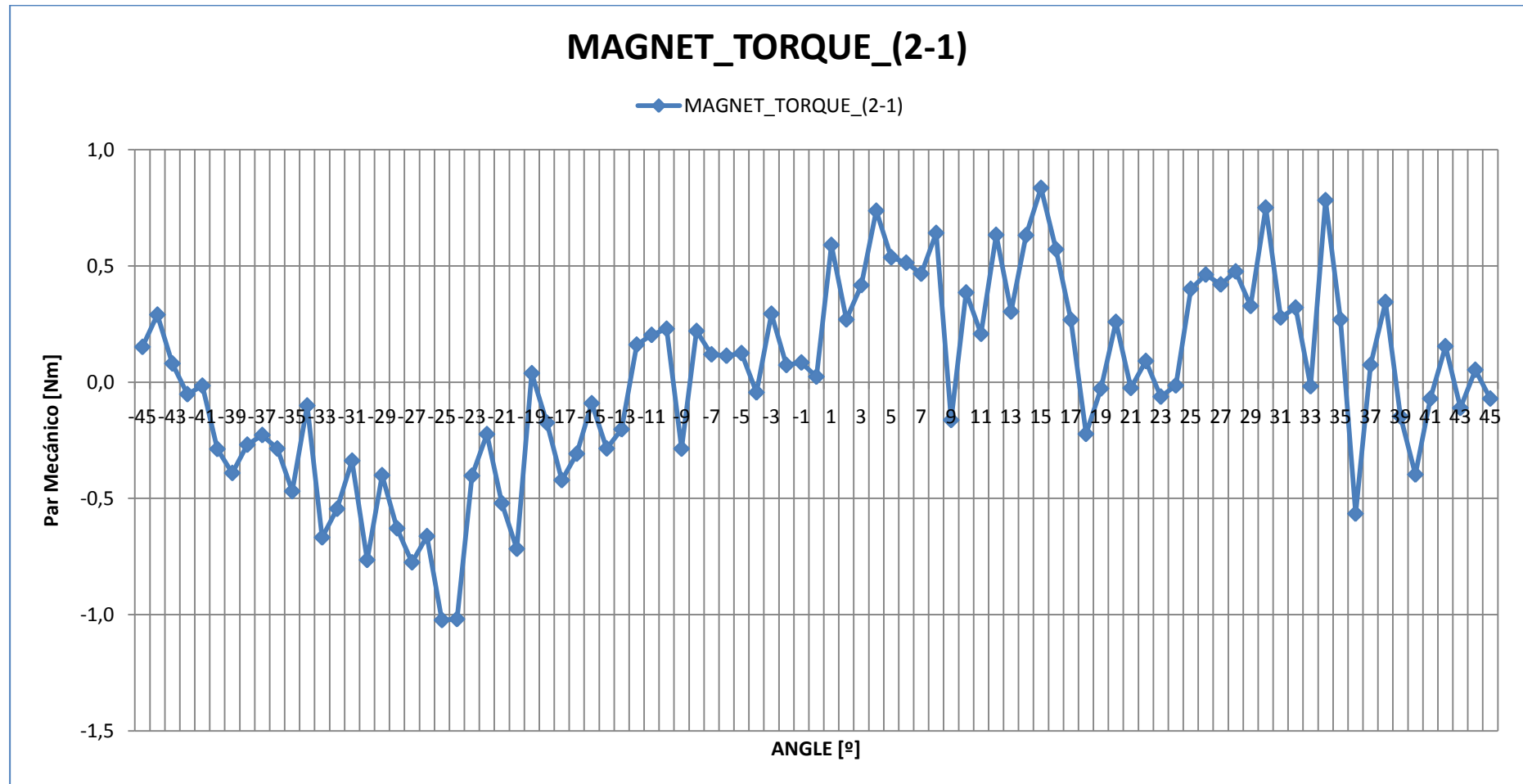


Figura 8.2: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=20$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.2.4. Datos referentes a $\alpha=30$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	0,6827	0,4756	-0,2071
-44	0,6161	0,2356	-0,3806
-43	0,6733	0,6219	-0,0514
-42	0,5430	0,2590	-0,2840
-41	0,7507	-0,2296	-0,9803
-40	0,2474	0,1319	-0,1155
-39	0,7916	0,0618	-0,7297
-38	0,0461	0,2581	0,2120
-37	0,1266	0,1305	0,0040
-36	0,1924	0,0209	-0,1715
-35	-0,2066	0,2314	0,4380
-34	-0,1340	0,3225	0,4565
-33	0,2650	0,6935	0,4285
-32	0,1578	0,6274	0,4697
-31	0,3488	0,3439	-0,0048
-30	0,3106	0,9888	0,6782
-29	0,5053	1,0381	0,5328
-28	0,1718	0,7303	0,5585
-27	0,3205	1,1364	0,8159
-26	0,5545	0,8238	0,2693
-25	0,5545	0,9917	0,4372
-24	0,5863	0,9481	0,3618
-23	0,8337	1,0915	0,2578
-22	0,5890	0,8457	0,2567
-21	0,7545	0,8908	0,1363
-20	0,9100	0,9021	-0,0079
-19	0,7253	0,9971	0,2718
-18	1,0889	0,6635	-0,4254
-17	1,0411	0,7216	-0,3195
-16	0,5616	0,7596	0,1980
-15	0,5549	0,9945	0,4396
-14	0,9028	0,8140	-0,0888
-13	0,8688	0,4776	-0,3912
-12	0,7116	0,5311	-0,1805
-11	0,6443	0,6909	0,0466
-10	0,9132	0,7580	-0,1552
-9	0,6637	0,9162	0,2525
-8	0,7436	0,5607	-0,1829



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-7	0,8673	0,6505	-0,2169
-6	0,6607	0,6562	-0,0045
-5	0,7771	0,6399	-0,1372
-4	0,9227	0,6248	-0,2980
-3	0,7115	0,3734	-0,3381
-2	1,0056	0,2921	-0,7135
-1	0,7830	0,6018	-0,1812
0	0,4525	0,0454	-0,4070
1	0,7490	0,3243	-0,4247
2	0,3436	0,3696	0,0260
3	0,4345	0,0794	-0,3550
4	0,4772	0,3355	-0,1417
5	0,1800	0,2814	0,1014
6	0,2006	0,6414	0,4408
7	0,0437	0,1378	0,0941
8	0,4857	0,1943	-0,2914
9	0,2036	0,8692	0,6656
10	0,1315	0,3685	0,2370
11	0,3428	0,4302	0,0874
12	0,3878	0,2765	-0,1113
13	0,2546	0,5646	0,3101
14	0,4184	0,8048	0,3864
15	-0,0309	0,4562	0,4872
16	0,3832	0,9489	0,5657
17	0,5953	0,5326	-0,0628
18	0,2717	0,2102	-0,0615
19	0,8244	0,5241	-0,3003
20	0,5004	0,3103	-0,1901
21	0,2290	0,4117	0,1827
22	0,4343	0,5398	0,1055
23	0,3981	0,6276	0,2294
24	0,5962	0,7934	0,1972
25	0,4537	1,4408	0,9871
26	0,3706	0,3219	-0,0486
27	0,4291	0,6677	0,2386
28	0,2942	1,1142	0,8200
29	0,6419	0,6964	0,0545
30	0,1755	0,7550	0,5795
31	0,7188	0,6308	-0,0879
32	0,5517	0,7571	0,2053



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
33	0,6228	0,6177	-0,0051
34	0,7208	0,3306	-0,3902
35	0,5214	0,1049	-0,4166
36	0,7354	0,5475	-0,1880
37	0,8774	0,0741	-0,8032
38	0,9701	0,3059	-0,6642
39	0,5365	0,5521	0,0156
40	0,7944	0,3203	-0,4742
41	0,8766	0,5458	-0,3308
42	0,8888	0,5107	-0,3781
43	0,6702	0,2830	-0,3872
44	0,6362	0,2788	-0,3574
45	0,5946	0,3109	-0,2837

Tabla 8.5: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=30$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

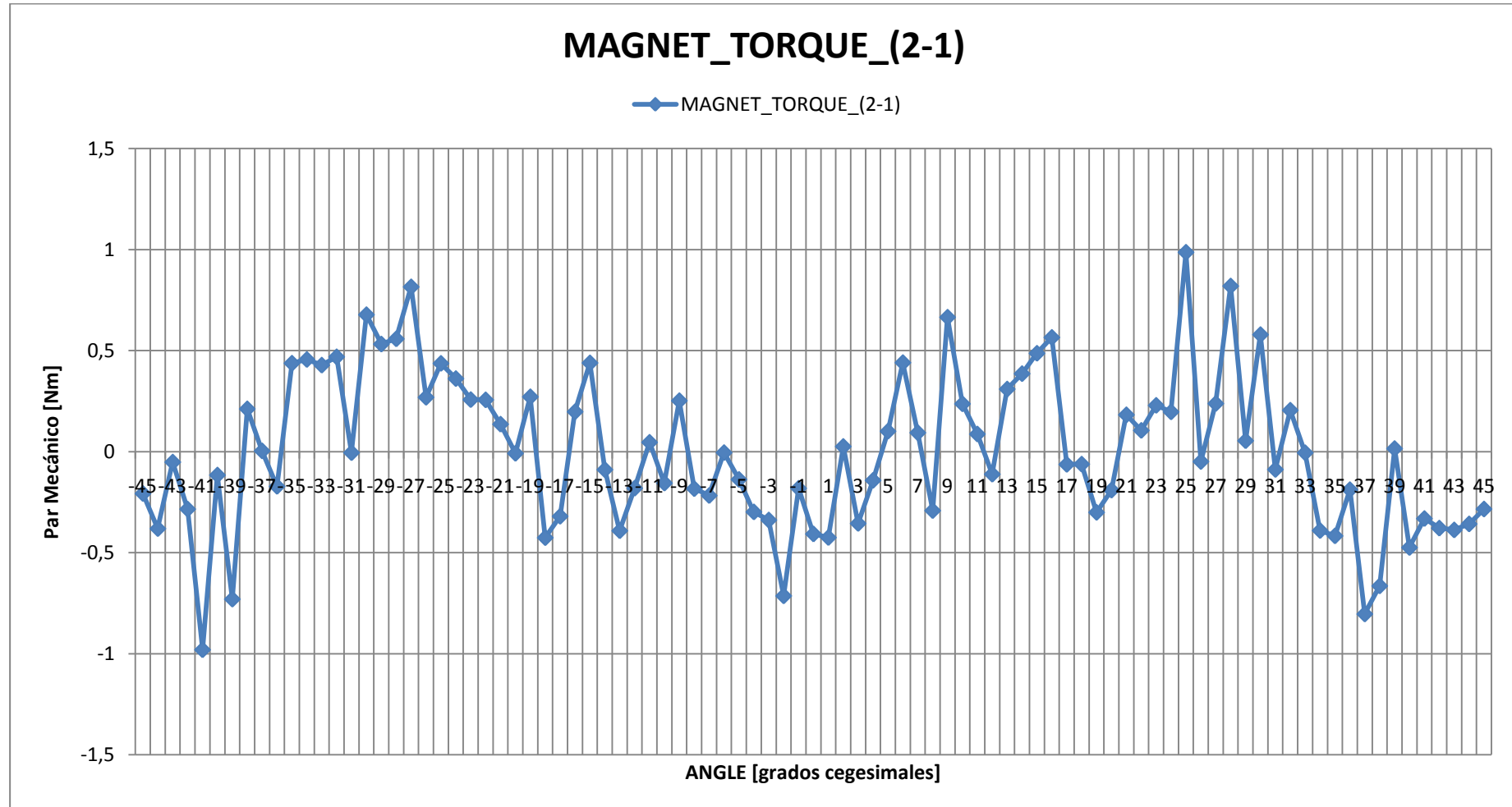


Figura 8.3: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=30$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.2.5. Datos referentes a $\alpha=40$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	0,3177	0,0095	-0,3082
-44	0,1436	-0,0117	-0,1553
-43	0,5057	0,1216	-0,3841
-42	0,1295	0,2209	0,0913
-41	0,2423	0,1585	-0,0839
-40	0,2726	0,0756	-0,1971
-39	0,0467	0,3667	0,3200
-38	0,0331	0,4217	0,3886
-37	-0,1340	0,2430	0,3770
-36	-0,2887	0,3410	0,6297
-35	0,0858	0,3560	0,2701
-34	-0,1580	0,5616	0,7196
-33	-0,1920	0,4041	0,5961
-32	-0,3029	0,5404	0,8433
-31	-0,0126	0,3086	0,3212
-30	0,1508	0,6112	0,4604
-29	-0,0123	0,5396	0,5518
-28	0,1737	0,2830	0,1092
-27	0,1466	0,5666	0,4200
-26	-0,1024	0,2085	0,3109
-25	0,0900	0,2414	0,1514
-24	0,2430	0,1303	-0,1127
-23	0,3055	0,1165	-0,1889
-22	0,1160	-0,0767	-0,1927
-21	0,0973	0,1110	0,0137
-20	0,0043	0,0422	0,0379
-19	0,5463	0,5035	-0,0428
-18	0,4331	0,0355	-0,3976
-17	0,5670	0,0199	-0,5471
-16	0,0781	0,3493	0,2712
-15	0,1428	-0,0594	-0,2022
-14	0,2557	0,0695	-0,1862
-13	0,4249	0,1493	-0,2756
-12	0,3067	0,1318	-0,1749
-11	0,2755	0,1751	-0,1005
-10	0,3250	-0,1115	-0,4365
-9	0,2521	-0,0890	-0,3411
-8	0,3614	0,0074	-0,3540



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-7	0,4578	-0,4332	-0,8910
-6	0,4938	0,0373	-0,4565
-5	0,5191	-0,1762	-0,6953
-4	0,2118	-0,2304	-0,4421
-3	0,3358	-0,1804	-0,5162
-2	0,2276	-0,5569	-0,7845
-1	0,2641	-0,3571	-0,6212
0	0,3121	0,0230	-0,2891
1	0,0814	-0,0745	-0,1558
2	-0,1076	0,2895	0,3970
3	-0,1994	0,1723	0,3717
4	-0,2599	0,3317	0,5916
5	-0,1954	0,2440	0,4394
6	-0,5878	0,4380	1,0258
7	-0,0048	0,1117	0,1165
8	-0,1519	0,3719	0,5238
9	0,1686	0,0157	-0,1529
10	-0,2089	-0,1052	0,1038
11	-0,3510	0,1854	0,5363
12	0,0265	0,4548	0,4283
13	0,2701	0,0437	-0,2264
14	-0,0339	0,4090	0,4428
15	-0,0164	0,5615	0,5779
16	-0,2292	0,3484	0,5776
17	0,0385	0,8082	0,7696
18	0,3799	0,3027	-0,0772
19	0,1504	0,5563	0,4058
20	0,2587	0,0145	-0,2442
21	0,1901	0,7040	0,5139
22	0,3301	0,3437	0,0136
23	0,2420	0,2546	0,0126
24	-0,0429	0,0842	0,1271
25	0,0458	0,1730	0,1272
26	0,1056	0,1354	0,0298
27	0,4554	0,3460	-0,1094
28	0,1177	0,1745	0,0568
29	0,0462	0,0467	0,0005
30	0,2306	0,1076	-0,1231
31	0,0341	-0,1125	-0,1466
32	0,2452	-0,1352	-0,3805



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
33	0,1752	0,5535	0,3782
34	0,4393	-0,0011	-0,4404
35	0,4773	0,0569	-0,4204
36	0,8105	0,2944	-0,5161
37	0,4654	-0,0526	-0,5180
38	0,3004	-0,1936	-0,4940
39	0,4431	-0,3408	-0,7839
40	0,5521	0,0345	-0,5176
41	0,2583	-0,4092	-0,6675
42	0,4268	-0,0574	-0,4842
43	0,2707	-0,4298	-0,7004
44	0,4108	-0,3771	-0,7878
45	0,4514	-0,3137	-0,7652

Tabla 8.6: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=40$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

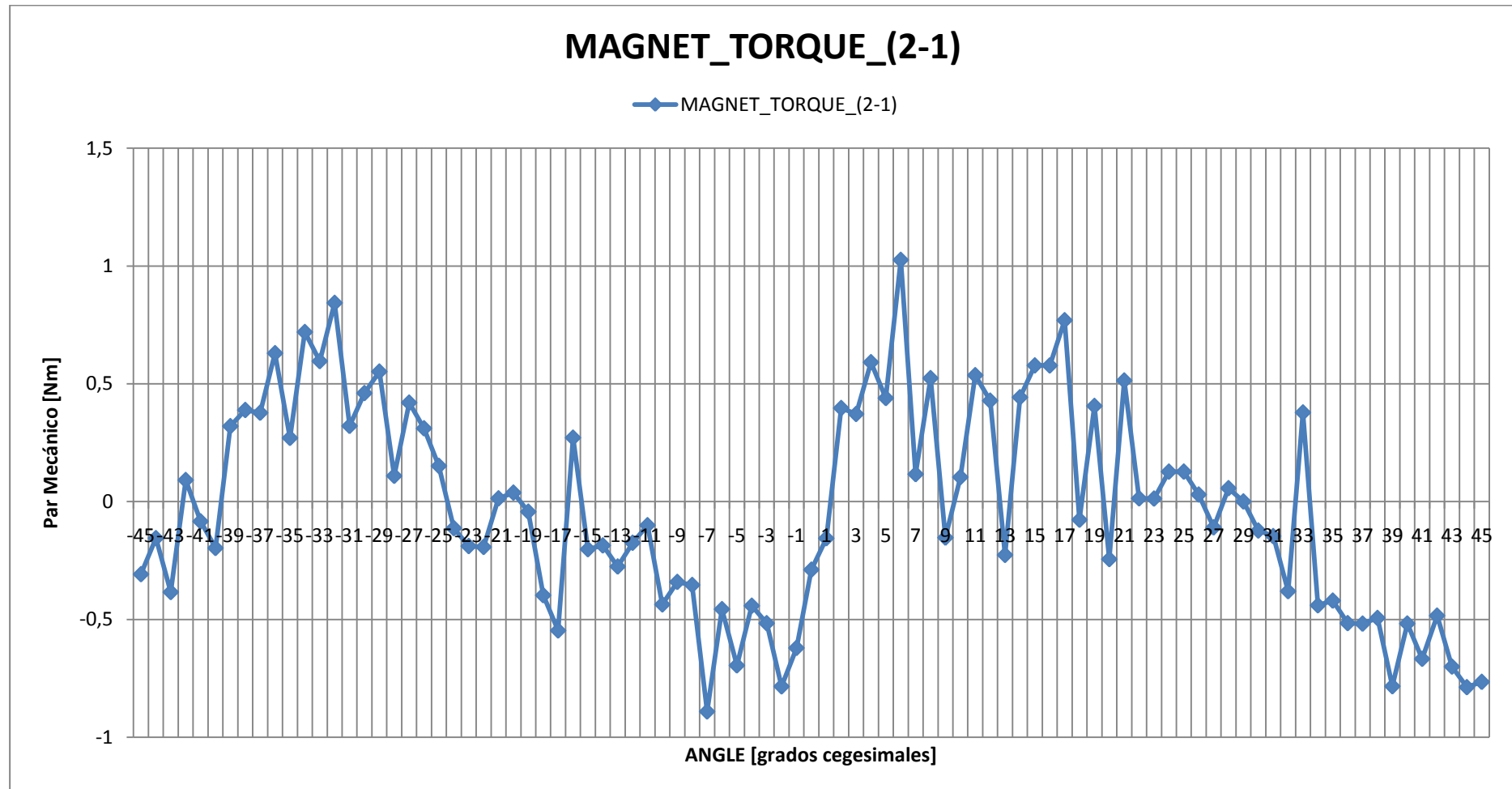


Figura 8.4: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=40$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.2.6. Datos referentes a $\alpha=45$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	0,2606	0,0800	-0,1806
-44	0,0438	0,3429	0,2990
-43	0,0679	0,4125	0,3446
-42	-0,0503	0,2665	0,3168
-41	-0,3627	0,1699	0,5326
-40	-0,0778	0,4705	0,5484
-39	-0,0118	0,5389	0,5507
-38	-0,5109	0,2342	0,7452
-37	-0,4398	0,4828	0,9226
-36	-0,3682	0,2764	0,6446
-35	-0,6574	0,2119	0,8694
-34	-0,5153	0,1644	0,6797
-33	-0,2838	-0,0401	0,2437
-32	-0,4688	0,2475	0,7163
-31	-0,2652	0,0781	0,3433
-30	-0,2031	0,0082	0,2114
-29	-0,2898	-0,1384	0,1513
-28	-0,1047	-0,3762	-0,2715
-27	-0,1866	-0,2563	-0,0697
-26	-0,2212	0,0921	0,3133
-25	0,0808	0,3595	0,2788
-24	0,1509	0,2522	0,1013
-23	0,2290	0,2589	0,0299
-22	-0,0070	0,1019	0,1089
-21	-0,0392	-0,2541	-0,2149
-20	-0,0463	-0,1947	-0,1484
-19	0,2773	-0,2663	-0,5436
-18	0,3120	0,2109	-0,1011
-17	-0,0060	-0,1688	-0,1628
-16	-0,0580	-0,0357	0,0224
-15	0,4173	-0,3555	-0,7728
-14	0,2459	-0,3347	-0,5806
-13	0,0919	-0,4333	-0,5253
-12	0,1803	-0,5495	-0,7298
-11	-0,0041	-0,3608	-0,3567
-10	0,1674	-0,4198	-0,5872
-9	-0,0390	-0,4694	-0,4304
-8	0,1284	0,1979	0,0696



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-7	-0,0554	-0,4928	-0,4374
-6	0,0536	-0,3181	-0,3717
-5	0,0530	0,0660	0,0130
-4	0,2040	-0,1208	-0,3247
-3	0,1576	-0,1317	-0,2893
-2	0,1552	0,3306	0,1754
-1	0,0317	0,1092	0,0775
0	-0,1603	0,0582	0,2185
1	0,0065	-0,0843	-0,0908
2	-0,0981	0,2052	0,3033
3	-0,3484	-0,1155	0,2329
4	-0,1406	-0,0166	0,1240
5	-0,4114	-0,0643	0,3471
6	-0,2964	-0,0161	0,2803
7	-0,2652	-0,1580	0,1072
8	-0,0349	0,3229	0,3578
9	-0,4403	0,1197	0,5599
10	-0,0478	0,2888	0,3366
11	-0,3715	0,3812	0,7527
12	-0,1548	0,3927	0,5474
13	0,0670	0,9619	0,8949
14	0,0188	0,3366	0,3179
15	-0,0653	0,1363	0,2016
16	0,0203	0,6632	0,6429
17	-0,1985	0,2336	0,4321
18	-0,0210	0,1590	0,1800
19	-0,0669	0,0038	0,0706
20	0,0934	0,1611	0,0677
21	0,0165	0,1276	0,1111
22	0,0124	0,1971	0,1848
23	0,1207	0,1048	-0,0159
24	-0,0531	-0,0237	0,0293
25	0,1302	0,0513	-0,0789
26	0,1243	-0,1831	-0,3074
27	0,0151	-0,0603	-0,0754
28	-0,0622	0,1597	0,2219
29	0,3367	-0,0083	-0,3450
30	0,0727	-0,1522	-0,2248
31	0,2750	-0,0980	-0,3730
32	0,2729	-0,2242	-0,4972



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
33	0,2116	-0,2056	-0,4171
34	0,0353	-0,1159	-0,1512
35	0,0661	-0,3385	-0,4047
36	0,2567	-0,4449	-0,7017
37	0,0511	-0,0223	-0,0733
38	0,1790	-0,4905	-0,6695
39	0,5306	-0,4590	-0,9896
40	0,4512	-0,1533	-0,6045
41	0,5275	-0,5783	-1,1058
42	0,0888	0,0466	-0,0423
43	0,1409	-0,0387	-0,1796
44	0,0564	0,1020	0,0455
45	0,2613	0,0483	-0,2130

Tabla 8.7: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=45$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

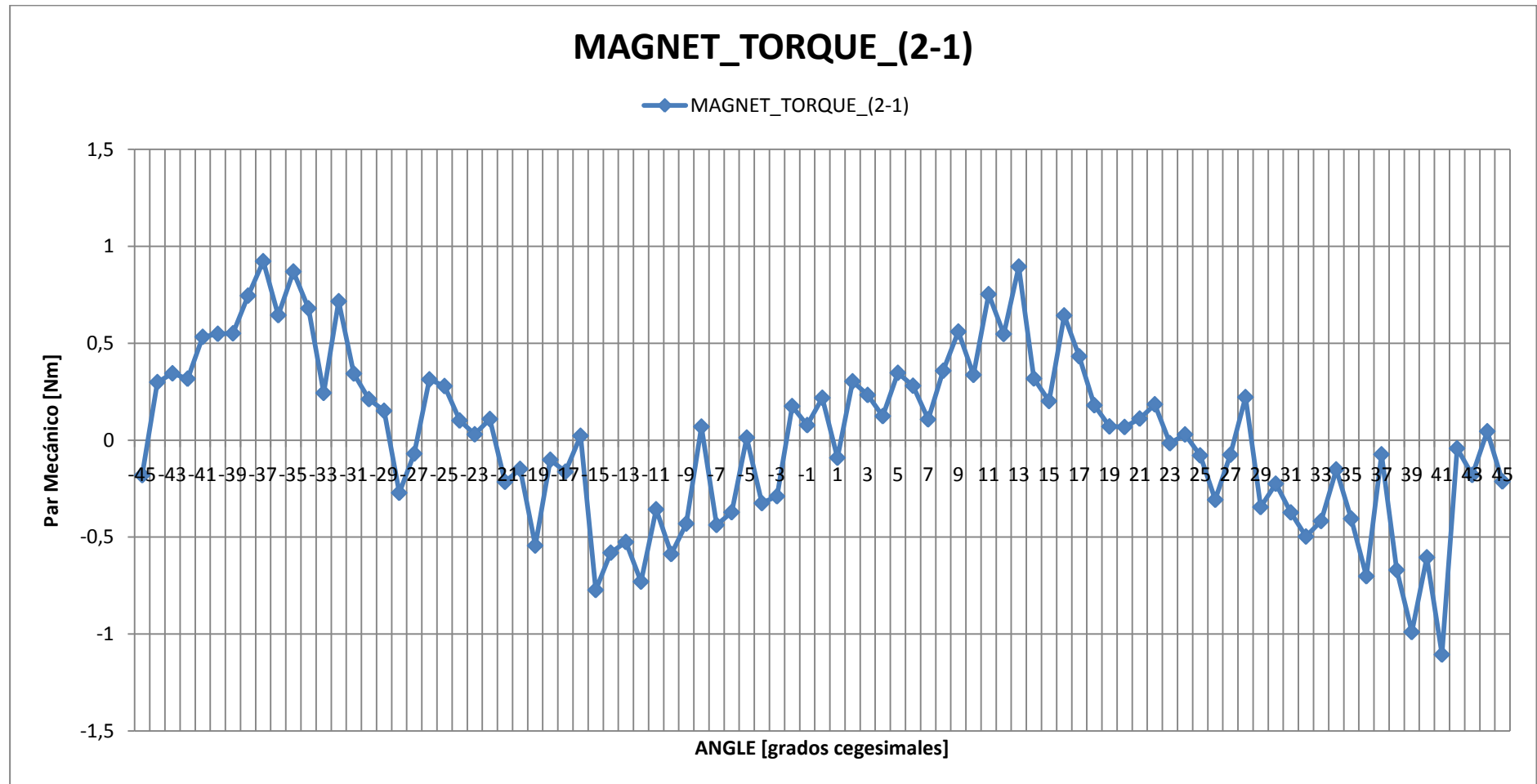


Figura 8.5: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=45$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.2.7. Datos referentes a $\alpha=50$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	-0,2473	0,1970	0,4442
-44	-0,0979	0,5069	0,6048
-43	-0,1985	0,1571	0,3555
-42	-0,2385	0,0328	0,2713
-41	-0,2786	-0,1149	0,1638
-40	-0,4549	0,0141	0,4690
-39	-0,0516	0,0708	0,1224
-38	-0,2109	-0,1510	0,0599
-37	-0,2086	0,2290	0,4376
-36	-0,3688	-0,0162	0,3526
-35	-0,6752	-0,0773	0,5978
-34	-0,2009	-0,2128	-0,0119
-33	-0,3136	-0,1018	0,2118
-32	-0,2682	0,0056	0,2738
-31	-0,0956	0,1875	0,2832
-30	0,1959	0,1636	-0,0323
-29	-0,4059	-0,0063	0,3997
-28	-0,5394	-0,1787	0,3606
-27	-0,3415	-0,1765	0,1651
-26	-0,4212	-0,1345	0,2867
-25	-0,2015	-0,2687	-0,0672
-24	0,1083	-0,2050	-0,3134
-23	-0,0697	-0,3605	-0,2908
-22	0,0774	-0,1504	-0,2278
-21	0,0479	-0,1446	-0,1925
-20	0,0921	-0,5200	-0,6121
-19	0,1145	-0,6048	-0,7193
-18	-0,2328	-0,4598	-0,2270
-17	0,3288	-0,5992	-0,9280
-16	-0,4126	-0,7480	-0,3354
-15	-0,0383	-0,3926	-0,3543
-14	0,2129	-0,4334	-0,6463
-13	-0,0267	-0,7215	-0,6948
-12	0,0324	-0,8037	-0,8361
-11	-0,1169	-0,4721	-0,3552
-10	-0,2507	-0,4464	-0,1958
-9	-0,0395	-0,4356	-0,3961
-8	0,2160	-0,4184	-0,6344



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-7	0,0624	-0,2817	-0,3440
-6	0,2202	-0,0600	-0,2802
-5	-0,1843	-0,2817	-0,0974
-4	-0,0106	-0,5119	-0,5013
-3	-0,0753	-0,3911	-0,3158
-2	-0,1968	-0,1394	0,0574
-1	0,1491	-0,3685	-0,5176
0	-0,2336	-0,2297	0,0039
1	-0,3170	-0,1925	0,1245
2	-0,2829	0,0284	0,3112
3	-0,1883	-0,1988	-0,0105
4	-0,1629	0,2354	0,3983
5	-0,3450	0,2347	0,5798
6	-0,4869	0,3677	0,8546
7	-0,4802	0,3041	0,7842
8	-0,4631	0,3474	0,8105
9	-0,4846	0,3639	0,8485
10	-0,3563	0,1704	0,5267
11	-0,3424	0,3108	0,6532
12	-0,2149	0,3069	0,5219
13	-0,2416	-0,0217	0,2199
14	-0,4433	0,0568	0,5001
15	-0,3353	-0,1811	0,1542
16	-0,1815	-0,1901	-0,0086
17	-0,4052	-0,1389	0,2663
18	-0,1764	-0,0327	0,1438
19	-0,3331	-0,0958	0,2373
20	-0,0849	-0,0126	0,0723
21	-0,2485	-0,3843	-0,1358
22	-0,1766	-0,3530	-0,1763
23	-0,0551	0,0700	0,1251
24	-0,2301	0,0462	0,2764
25	0,1167	0,0294	-0,0872
26	0,0089	0,0183	0,0094
27	-0,1160	-0,2655	-0,1495
28	-0,3242	-0,1223	0,2019
29	0,1484	-0,4606	-0,6091
30	0,3744	-0,4557	-0,8301
31	0,0451	-0,4296	-0,4747
32	0,1557	-0,2079	-0,3636



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
33	0,0529	-0,8669	-0,9198
34	0,2250	-0,5624	-0,7874
35	-0,0750	-0,3433	-0,2683
36	0,0122	-0,6607	-0,6729
37	0,3295	-0,2378	-0,5673
38	-0,0583	-0,2026	-0,1443
39	0,1889	-0,1097	-0,2986
40	0,1605	-0,1152	-0,2756
41	0,1444	-0,2033	-0,3476
42	0,0009	0,1469	0,1460
43	0,1302	-0,1542	-0,2843
44	-0,3301	-0,0811	0,2489
45	0,1384	0,1694	0,0309

Tabla 8.8: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=50$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

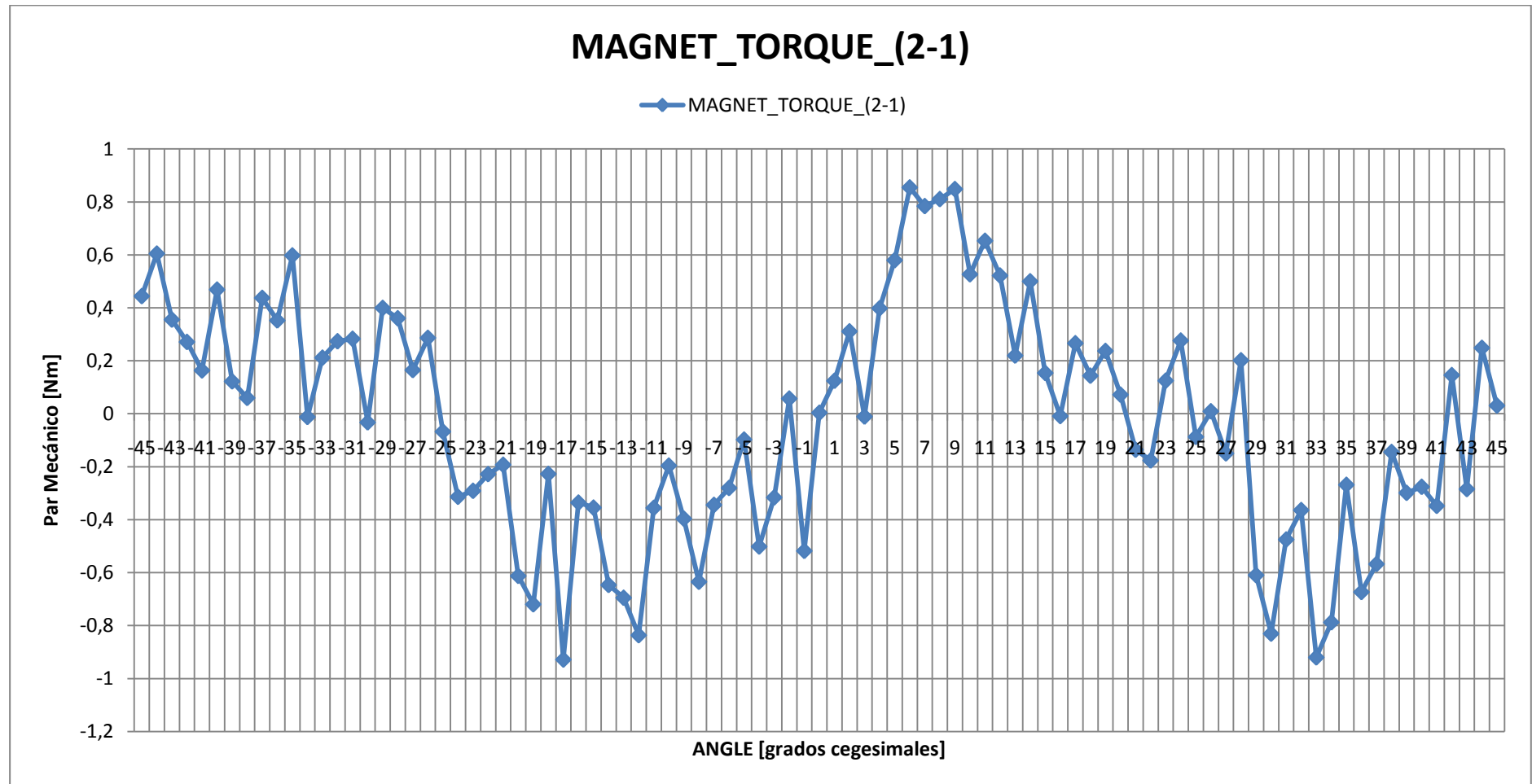


Figura 8.6: Gráfica del par magnético neto resultante de la resta de RUEDA_2-RUEDA_1 con $\alpha=50$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.3. Datos obtenidos del estudio de la distancia sobre dos bloques de imanes

Orientación axial		Orientación radial	
DIST	FUERZA/Module	DIST	FUERZA/Module
0	47,6555	0	309,0500
1	42,8839	1	279,6201
2	39,2570	2	249,7565
3	37,5619	3	224,9209
4	32,8356	4	202,4406
5	27,3292	5	185,3451
6	25,0481	6	172,6762
7	25,1171	7	161,0397
8	24,6187	8	144,2116
9	21,9154	9	130,7001
10	20,6176	10	118,2062
11	19,5901	11	112,8059
12	16,9693	12	107,6732
13	18,3596	13	109,7638
14	15,6640	14	92,7669
15	16,0486	15	86,3119
16	16,6472	16	86,1662
17	14,5848	17	79,0520
18	15,0740	18	72,0652
19	11,8200	19	77,0155
20	10,7975	20	70,6487
21	11,1582	21	62,8866
22	11,2797	22	54,9427
23	13,9634	23	60,8022
24	11,2152	24	58,8345
25	9,4442	25	55,2169
26	10,2724	26	54,1685
27	10,2275	27	48,9169
28	10,9426	28	64,0916
29	7,9047	29	49,4244

Tabla 8.9: Datos de fuerza para imanes con orientación axial y radial



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.4. Análisis del modelo con imanes de orientación radial del campo magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	0,47722	-1,18739	-1,66461
-44	1,06183	1,26121	0,19938
-43	0,28832	0,35622	0,06790
-42	0,07036	1,25083	1,18046
-41	-0,40962	0,79520	1,20482
-40	-0,01516	1,64304	1,65820
-39	-1,20145	2,03167	3,23312
-38	-1,49456	1,02448	2,51904
-37	-0,40027	1,40160	1,80187
-36	-0,58172	1,38340	1,96511
-35	-1,64459	2,34599	3,99058
-34	-0,61187	1,44493	2,05679
-33	-2,30798	0,78557	3,09356
-32	-0,47441	0,97691	1,45132
-31	-1,79801	1,23589	3,03390
-30	-0,62880	2,77718	3,40599
-29	-0,24293	1,80092	2,04384
-28	-1,17437	1,28791	2,46228
-27	-0,79991	1,51388	2,31379
-26	-1,35139	0,24531	1,59670
-25	-0,78888	-1,15635	-0,36748
-24	0,40024	0,29674	-0,10350
-23	0,26042	-0,09436	-0,35478
-22	1,22307	-0,43080	-1,65387
-21	0,70667	0,40189	-0,30478
-20	1,28555	-1,21888	-2,50443
-19	1,08257	-1,49245	-2,57502
-18	1,53666	-1,23879	-2,77545
-17	2,79986	-0,98945	-3,78931
-16	1,58670	-1,90661	-3,49332
-15	1,65133	-1,43002	-3,08135
-14	0,84822	-2,83068	-3,67890
-13	2,84110	-1,23799	-4,07908
-12	2,60065	-3,33772	-5,93836
-11	2,06018	-2,01571	-4,07589
-10	1,77935	-2,27972	-4,05908
-9	3,17152	-1,36899	-4,54051



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-8	2,42026	-0,98627	-3,40653
-7	2,25660	-4,04695	-6,30355
-6	2,40960	-2,37088	-4,78048
-5	2,31629	-3,17876	-5,49506
-4	1,28610	-1,52302	-2,80911
-3	0,11838	-2,11352	-2,23190
-2	1,26070	-0,29933	-1,56003
-1	1,37905	-1,08569	-2,46473
0	0,24679	0,51150	0,26472
1	-0,12847	-1,15170	-1,02323
2	-0,40412	-0,04166	0,36247
3	-1,02176	0,13956	1,16133
4	-2,63530	1,63367	4,26897
5	-1,98278	1,37300	3,35579
6	-1,95357	1,41207	3,36564
7	-2,42928	1,81392	4,24320
8	-1,71065	2,43557	4,14622
9	-2,07653	2,91098	4,98750
10	-2,63270	3,27833	5,91103
11	-1,03059	2,18913	3,21972
12	-1,30127	1,79738	3,09865
13	-1,15653	1,20634	2,36286
14	-2,90186	1,86107	4,76293
15	-1,34051	2,12552	3,46603
16	-2,75405	2,27531	5,02936
17	-2,53100	2,05285	4,58385
18	-1,65680	2,56854	4,22534
19	-1,67965	1,52025	3,19990
20	-0,39331	-0,40134	-0,00803
21	-0,97672	0,37688	1,35360
22	-0,59783	-0,02819	0,56964
23	-1,09562	-0,98374	0,11188
24	-0,97751	-0,56096	0,41656
25	-0,53558	0,17247	0,70805
26	1,40352	0,15508	-1,24844
27	1,09621	-0,80165	-1,89786
28	0,64755	-1,24075	-1,88830
29	1,25530	0,73425	-0,52105
30	1,03399	-0,44953	-1,48351
31	1,47161	-1,40442	-2,87603



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
32	1,15389	-0,22657	-1,38046
33	1,69295	-1,38938	-3,08233
34	1,28174	-2,25442	-3,53616
35	1,88286	-1,69938	-3,58224
36	-0,92057	-0,16786	0,75270
37	1,96598	-0,88567	-2,85165
38	0,36221	0,03838	-0,32383
39	0,93462	-0,06510	-0,99972
40	0,84260	-0,10300	-0,94560
41	-0,49471	-0,69957	-0,20486
42	1,32804	-0,32378	-1,65182
43	-0,57225	-0,37354	0,19871
44	0,85940	-0,15361	-1,01301
45	0,46814	0,47198	0,00384

Tabla 8.10: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=0$ y $\beta=0$



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.5. Estudio del ángulo beta óptimo con ANGLE y alpha constante

8.1.5.1. Simulación para alpha=0 grados

ANG_BETA	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2
0	0,4882	0,2085
-1	0,0701	-0,2285
-2	-0,3480	-0,6649
-3	-0,7657	-1,1002
-4	-1,1824	-1,5340
-5	-1,5976	-1,9656
-6	-2,0109	-2,3946
-7	-2,4217	-2,8204
-8	-2,8295	-3,2425
-9	-3,2338	-3,6604
-10	-3,6342	-4,0736
-11	-4,0301	-4,4816
-12	-4,4210	-4,8839
-13	-4,8066	-5,2800
-14	-5,1862	-5,6694
-15	-5,5596	-6,0516
-16	-5,9261	-6,4263
-17	-6,2853	-6,7928
-18	-6,6369	-7,1508
-19	-6,9804	-7,4998
-20	-7,3153	-7,8395
-21	-7,6413	-8,1693
-22	-7,9580	-8,4890
-23	-8,2649	-8,7980
-24	-8,5617	-9,0961
-25	-8,8481	-9,3829
-26	-9,1236	-9,6579
-27	-9,3880	-9,9210
-28	-9,6410	-10,1717
-29	-9,8822	-10,4097
-30	-10,1113	-10,6348
-31	-10,3280	-10,8468
-32	-10,5322	-11,0452
-33	-10,7235	-11,2300
-34	-10,9016	-11,4008



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANG_BETA	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2
-35	-11,0665	-11,5574
-36	-11,2179	-11,6998
-37	-11,3556	-11,8276
-38	-11,4794	-11,9408
-39	-11,5892	-12,0391
-40	-11,6848	-12,1226
-41	-11,7662	-12,1910
-42	-11,8332	-12,2443
-43	-11,8858	-12,2825
-44	-11,9238	-12,3054
-45	-11,9473	-12,3131
-46	-11,9562	-12,3055
-47	-11,9506	-12,2827
-48	-11,9303	-12,2447
-49	-11,8955	-12,1915
-50	-11,8461	-12,1232
-51	-11,7823	-12,0399
-52	-11,7041	-11,9416
-53	-11,6116	-11,8286
-54	-11,5049	-11,7009
-55	-11,3842	-11,5587
-56	-11,2496	-11,4021
-57	-11,1013	-11,2314
-58	-10,9394	-11,0468
-59	-10,7641	-10,8485
-60	-10,5757	-10,6367

Tabla 8.11: Datos de par mecánico para $\alpha=0$ y $\text{angle}=0$

8.1.5.2 Simulación para $\alpha=10$ grados

ANG_BETA	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2
0	8,8372	8,9068
-1	8,8461	8,9547
-2	8,8445	8,9923
-3	8,8323	9,0196
-4	8,8096	9,0367
-5	8,7764	9,0434



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANG_BETA	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2
-6	8,7327	9,0399
-7	8,6786	9,0260
-8	8,6142	9,0018
-9	8,5395	8,9674
-10	8,4546	8,9227
-11	8,3597	8,8678
-12	8,2548	8,8029
-13	8,1400	8,7279
-14	8,0156	8,6430
-15	7,8817	8,5483
-16	7,7383	8,4438
-17	7,5858	8,3298
-18	7,4243	8,2063
-19	7,2539	8,0735
-20	7,0750	7,9316
-21	6,8876	7,7807
-22	6,6921	7,6210
-23	6,4887	7,4527
-24	6,2776	7,2761
-25	6,0590	7,0913
-26	5,8333	6,8985
-27	5,6008	6,6981
-28	5,3616	6,4902
-29	5,1162	6,2751
-30	4,8647	6,0530
-31	4,6076	5,8243
-32	4,3450	5,5891
-33	4,0774	5,3479
-34	3,8051	5,1008
-35	3,5283	4,8482
-36	3,2475	4,5904
-37	2,9629	4,3278
-38	2,6750	4,0605
-39	2,3840	3,7890
-40	2,0904	3,5136
-41	1,7945	3,2346
-42	1,4966	2,9523
-43	1,1971	2,6672
-44	0,8963	2,3795
-45	0,5947	2,0896



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANG_BETA	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2
-46	0,2926	1,7979
-47	-0,0096	1,5047
-48	-0,3115	1,2103
-49	-0,6129	0,9152
-50	-0,9133	0,6196
-51	-1,2123	0,3240
-52	-1,5097	0,0287
-53	-1,8050	-0,2659
-54	-2,0978	-0,5596
-55	-2,3879	-0,8518
-56	-2,6748	-1,1423
-57	-2,9582	-1,4307
-58	-3,2378	-1,7167
-59	-3,5132	-1,9998
-60	-3,7841	-2,2799

Tabla 8.12: Datos de par mecánico para $\alpha=10$ y $\text{angle}=0$



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.6. Modelo de dos ruedas con $\alpha=10$

8.1.6.1 Modelo de 2 ruedas con $\beta=0$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	1,1355	2,5870	1,4515
-44	1,4175	2,0166	0,5991
-43	1,6648	2,0051	0,3403
-42	-0,2180	2,1550	2,3730
-41	0,5410	2,2513	1,7103
-40	0,0837	1,4313	1,3476
-39	2,2020	1,2449	-0,9571
-38	2,0211	2,4208	0,3997
-37	-0,0154	2,8239	2,8394
-36	0,8652	1,6765	0,8113
-35	0,8317	3,6155	2,7838
-34	0,9602	2,1804	1,2202
-33	0,9096	3,6174	2,7078
-32	2,4931	3,5253	1,0322
-31	2,4203	4,3420	1,9218
-30	0,6104	2,9848	2,3745
-29	1,6901	3,4058	1,7157
-28	2,2557	3,4706	1,2149
-27	2,4589	2,4876	0,0287
-26	1,3678	4,0821	2,7143
-25	1,6512	5,2793	3,6281
-24	2,0559	3,9772	1,9212
-23	3,9315	5,1340	1,2025
-22	3,8372	5,0605	1,2234
-21	3,7635	4,7263	0,9628
-20	5,1573	4,4638	-0,6935
-19	6,9292	6,5095	-0,4197
-18	6,8222	5,7849	-1,0373
-17	6,3365	7,2966	0,9601
-16	8,8082	6,4658	-2,3424
-15	8,5661	6,5210	-2,0451
-14	8,5149	7,3297	-1,1851
-13	9,2673	6,9103	-2,3570
-12	8,8041	8,0172	-0,7869
-11	9,0393	7,1212	-1,9180
-10	9,6744	9,0308	-0,6436
-9	10,2563	9,3806	-0,8757



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-8	10,0013	9,2400	-0,7614
-7	9,9554	9,1883	-0,7671
-6	10,1711	9,7643	-0,4069
-5	9,4195	10,1133	0,6938
-4	9,5926	9,7529	0,1603
-3	10,0388	10,5754	0,5366
-2	9,5478	9,1482	-0,3996
-1	8,8016	9,1014	0,2998
0	8,9313	9,2421	0,3108
1	8,3056	9,6774	1,3718
2	8,1934	8,9871	0,7937
3	8,4059	9,3607	0,9548
4	8,1568	7,6559	-0,5009
5	6,4046	7,9488	1,5442
6	7,6196	7,7227	0,1031
7	6,6760	6,2385	-0,4375
8	5,7329	6,4057	0,6729
9	6,3125	6,3649	0,0524
10	5,1639	4,9364	-0,2275
11	3,6251	4,9825	1,3575
12	4,9117	3,4123	-1,4994
13	3,9457	3,4888	-0,4569
14	4,7950	1,2774	-3,5176
15	3,6704	2,2888	-1,3816
16	3,4378	2,5070	-0,9307
17	3,1860	3,5544	0,3685
18	2,9932	3,1666	0,1733
19	2,6023	0,9710	-1,6313
20	3,8537	1,8702	-1,9835
21	2,4382	1,7408	-0,6975
22	2,0629	1,1929	-0,8700
23	3,0096	0,9076	-2,1019
24	2,7273	0,5795	-2,1478
25	2,6137	0,4789	-2,1348
26	1,9506	1,5148	-0,4358
27	0,7114	-0,1057	-0,8171
28	2,4802	1,7733	-0,7069
29	2,4336	-0,0187	-2,4523
30	1,1389	0,8922	-0,2467
31	3,4986	1,2288	-2,2698
32	2,1040	1,0820	-1,0221



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
33	1,9167	0,0376	-1,8791
34	1,7892	1,1244	-0,6648
35	1,8791	1,1889	-0,6901
36	3,3021	1,0080	-2,2942
37	2,3418	1,1495	-1,1924
38	2,9771	2,5361	-0,4410
39	2,5296	0,9118	-1,6179
40	2,1061	2,1458	0,0397
41	2,6346	1,8008	-0,8339
42	1,7280	1,7528	0,0248
43	2,5406	1,7180	-0,8226
44	1,3002	2,4114	1,1112
45	2,0930	3,0028	0,9098

Tabla 8.13: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=0$ grados

8.1.6.2. Modelo de dos ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-45	1,0916	2,4752	1,3836
-44	1,2825	1,8018	0,5193
-43	1,6331	1,9235	0,2905
-42	-0,3312	1,7337	2,0650
-41	0,3978	1,9492	1,5513
-40	-0,2395	1,1315	1,3709
-39	2,2459	0,8076	-1,4383
-38	1,5773	1,8065	0,2292
-37	1,2513	2,3722	1,1209
-36	-0,7679	2,4744	3,2423
-35	0,7650	3,0086	2,2437
-34	0,5619	1,6882	1,1264
-33	0,4765	4,6710	4,1945
-32	2,5932	2,6444	0,0512
-31	2,1200	3,6121	1,4921
-30	0,4310	2,5517	2,1206
-29	1,4197	2,6315	1,2117
-28	2,0459	2,3954	0,3495
-27	2,0835	2,3586	0,2751
-26	1,5018	3,2305	1,7287



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
-25	1,4023	4,5085	3,1062
-24	2,1065	3,6263	1,5198
-23	3,9496	4,5413	0,5917
-22	3,9818	4,0439	0,0620
-21	4,0953	3,8579	-0,2375
-20	5,3654	3,4775	-1,8878
-19	6,5480	4,5467	-2,0013
-18	6,9421	4,8910	-2,0511
-17	6,9183	6,6304	-0,2879
-16	8,8422	5,2438	-3,5984
-15	8,7389	5,5693	-3,1696
-14	8,5945	6,2964	-2,2981
-13	9,4506	6,3197	-3,1310
-12	8,7190	7,0298	-1,6892
-11	8,9936	5,9599	-3,0337
-10	9,7388	8,3195	-1,4192
-9	10,0209	9,0079	-1,0130
-8	9,8233	8,2203	-1,6030
-7	9,9332	8,8697	-1,0635
-6	10,1304	9,4611	-0,6694
-5	8,9845	9,6244	0,6399
-4	9,2220	9,9235	0,7016
-3	9,5118	9,5236	0,0118
-2	9,4344	9,0342	-0,4001
-1	8,2327	9,0255	0,7928
0	8,0005	9,3801	1,3796
1	7,7909	10,1133	2,3223
2	7,0783	9,1220	2,0438
3	7,5303	9,5654	2,0351
4	7,2953	7,8219	0,5265
5	5,2715	8,1450	2,8735
6	6,4023	7,8085	1,4061
7	5,5436	6,3930	0,8494
8	4,5146	6,6234	2,1088
9	5,3031	6,6758	1,3727
10	3,7604	5,3757	1,6153
11	3,4879	4,9672	1,4792
12	3,8613	3,1675	-0,6938
13	2,8796	3,6298	0,7502
14	4,0569	1,4288	-2,6281
15	2,5739	2,4540	-0,1199



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_1	MAGNET_TORQUE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
16	2,4773	2,5806	0,1033
17	2,2016	3,5489	1,3474
18	2,0911	2,8894	0,7984
19	1,9581	0,8736	-1,0845
20	3,0083	1,5557	-1,4527
21	1,3461	1,6576	0,3114
22	1,9992	1,9403	-0,0589
23	2,6618	0,9630	-1,6988
24	2,2062	0,4676	-1,7386
25	2,1881	0,3493	-1,8388
26	1,8077	1,4792	-0,3285
27	0,5227	-0,3113	-0,8339
28	2,1295	1,7561	-0,3734
29	2,4962	-0,5490	-3,0452
30	1,6054	-0,4956	-2,1010
31	2,6793	0,0349	-2,6445
32	1,9229	0,5979	-1,3250
33	1,8740	-0,1308	-2,0047
34	-0,0119	1,2776	1,2895
35	1,7701	0,9458	-0,8243
36	3,1928	0,7654	-2,4274
37	2,3772	0,5560	-1,8212
38	2,9686	2,3918	-0,5767
39	2,2452	0,8644	-1,3808
40	1,7293	1,8842	0,1549
41	2,4453	1,7407	-0,7046
42	1,8366	1,3938	-0,4429
43	2,9640	1,7300	-1,2340
44	1,2827	2,3425	1,0598
45	0,3386	1,8345	1,4959

Tabla 8.14: Datos del modelo de 2 ruedas con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados

8.1.7. Modelo de 3 ruedas

8.1.7.1. Modelo de 3 ruedas con $\beta=0$ grados

ANG LE	MAGNET_TORQUE_RU EDA_1	MAGNET_TORQUE_RU EDA_2	MAGNET_TORQUE_RU EDA_3	MAGNET_TORQUE_ NETO
-45	0,6087	-2,1559	-1,8185	-0,9461



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANG LE	MAGNET_TORQUE_RU EDA_1	MAGNET_TORQUE_RU EDA_2	MAGNET_TORQUE_RU EDA_3	MAGNET_TORQUE_ NETO
-44	0,7012	-2,0277	-0,9987	-1,7302
-43	0,5746	-3,2708	-1,8709	-1,9745
-42	1,1976	-2,5236	-2,2255	-1,4956
-41	0,7238	-3,0410	-1,8624	-1,9023
-40	0,2200	-3,0685	-2,9534	-0,3351
-39	0,5836	-2,9782	-3,0288	-0,5329
-38	0,9770	-3,9627	-3,3992	-1,5405
-37	1,3835	-3,4369	-3,5940	-1,2264
-36	1,4087	-4,1116	-4,1356	-1,3847
-35	2,5336	-3,6369	-4,0550	-2,1155
-34	1,8085	-4,5227	-3,8112	-2,5201
-33	2,5463	-4,2280	-4,4361	-2,3382
-32	2,1361	-3,9985	-4,3883	-1,7463
-31	2,7527	-4,1939	-5,8421	-1,1044
-30	2,3290	-4,6035	-5,9684	-0,9641
-29	2,7385	-4,3117	-6,7894	-0,2609
-28	3,3127	-4,8293	-7,2712	-0,8707
-27	3,4249	-4,7426	-7,4634	-0,7041
-26	4,0587	-4,8613	-8,2014	-0,7186
-25	4,5317	-4,5459	-7,4618	-1,6159
-24	4,3929	-5,5702	-7,6205	-2,3426
-23	4,1095	-5,1980	-8,3579	-0,9496
-22	5,1353	-5,1563	-9,6936	-0,5980
-21	5,5392	-4,7230	-8,9685	-1,2938
-20	5,9352	-3,8591	-9,1996	-0,5948
-19	7,2443	-3,8262	-10,3828	-0,6876
-18	7,5732	-3,8246	-9,6372	-1,7605
-17	6,9546	-3,4457	-10,7230	0,3227
-16	7,0616	-3,2241	-10,7620	0,4763
-15	8,2122	-3,1594	-10,0484	-1,3232
-14	7,6391	-2,0231	-10,6456	0,9834
-13	9,0109	-2,0827	-10,6058	-0,4878
-12	8,6494	-1,3902	-10,7612	0,7217
-11	9,3611	-0,7859	-9,7970	-0,3500
-10	8,5824	-0,5704	-8,9404	-0,2124
-9	9,0021	0,1739	-9,4909	0,6627
-8	8,1181	0,5761	-9,4675	1,9254
-7	9,5992	1,2189	-9,5999	1,2196
-6	9,4076	1,5250	-9,1954	1,3128
-5	9,5394	1,5080	-8,6652	0,6337



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANG LE	MAGNET_TORQUE_RU EDA_1	MAGNET_TORQUE_RU EDA_2	MAGNET_TORQUE_RU EDA_3	MAGNET_TORQUE_ NETO
-4	9,5369	2,0594	-7,8490	0,3715
-3	9,0744	2,4861	-7,1928	0,6044
-2	8,7729	2,4875	-7,2506	0,9652
-1	9,0510	3,0044	-7,4567	1,4101
0	8,3367	2,5227	-6,9306	1,1166
1	8,2884	3,2978	-5,9944	1,0037
2	7,8880	3,9586	-5,6074	1,6780
3	8,2141	4,3496	-5,6743	1,8098
4	7,9197	4,6483	-5,0854	1,8140
5	7,2274	4,5150	-4,6442	1,9319
6	7,0026	4,2172	-5,0608	2,2755
7	6,5678	4,3054	-4,5962	2,3338
8	5,9942	3,8185	-4,1490	1,9733
9	5,1842	4,3478	-3,4473	2,6109
10	5,4771	3,9831	-3,2692	1,7753
11	4,2291	3,7967	-3,4722	3,0399
12	4,7132	3,4584	-3,7146	2,4599
13	5,1087	2,5984	-3,0236	0,5134
14	3,2446	3,4849	-2,4639	2,7041
15	3,3567	2,9565	-2,4037	2,0035
16	4,0029	3,3680	-1,7590	1,1241
17	3,0360	2,0195	-2,2382	1,2216
18	2,3628	2,2637	-1,9008	1,8018
19	1,5764	2,3733	-2,2052	3,0022
20	2,2002	2,4927	-1,6465	1,9390
21	2,0263	2,3189	-1,6893	1,9819
22	0,9623	1,8421	-1,9914	2,8712
23	0,4038	0,9033	-1,6887	2,1882
24	1,1427	1,7473	-1,5051	2,1097
25	0,7040	0,3818	-1,8219	1,4997
26	-0,1242	0,7623	-0,8391	1,7256
27	0,2440	1,1351	-0,8410	1,7321
28	0,5541	0,4560	-0,5169	0,4188
29	0,7161	0,7856	-1,4824	1,5519
30	-0,4512	0,1287	-0,9355	1,5154
31	0,3413	0,1526	-0,9432	0,7545
32	0,6230	-0,0102	-0,0434	-0,5898
33	-0,1527	0,0962	-0,9209	1,1698
34	0,7363	0,2356	-0,0214	-0,4793
35	0,2586	-0,7656	-0,7149	-0,3093



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANG LE	MAGNET_TORQUE_RU EDA_1	MAGNET_TORQUE_RU EDA_2	MAGNET_TORQUE_RU EDA_3	MAGNET_TORQUE_ NETO
36	0,1905	-0,8050	-1,0910	0,0954
37	0,1444	-0,8422	-0,9048	-0,0819
38	-0,0011	-1,0000	-0,4999	-0,4989
39	-0,2047	-0,4601	-1,2456	0,9901
40	0,6148	-1,5128	-1,0710	-1,0566
41	0,5697	-1,6656	-1,2474	-0,9879
42	0,5231	-1,8726	-0,8074	-1,5882
43	0,9122	-2,1571	-2,0060	-1,0634
44	0,7508	-1,8474	-0,7986	-1,7995
45	0,6810	-2,6328	-1,9703	-1,3435

Tabla 8.15: Datos del modelo de 3 ruedas con $\beta=0$ grados y $\alpha=10$ grados

8.1.7.2. Modelo de ruedas con $\beta=-15$ grados

ANGL E	MAGNET_TORQUE_RU EDA_1	MAGNET_TORQUE_RU EDA_2	MAGNET_TORQUE_RU EDA_3	MAGNET_TORQUE_ NETO
-45	0,2957	-2,6337	-2,2753	-0,6542
-44	0,4308	-2,4425	-1,5337	-1,3395
-43	0,2562	-3,7222	-2,3768	-1,6017
-42	0,9227	-2,8719	-3,0227	-0,7719
-41	0,3638	-3,4502	-2,6163	-1,1977
-40	-0,1205	-3,5002	-3,4160	0,0362
-39	0,3648	-3,4189	-3,7388	-0,0449
-38	0,7485	-4,4143	-3,8098	-1,3530
-37	0,8698	-3,8532	-4,1562	-0,5668
-36	1,0133	-4,2926	-4,7117	-0,5942
-35	2,4240	-3,8722	-4,6604	-1,6358
-34	1,4652	-4,7460	-4,2262	-1,9849
-33	2,2978	-4,4212	-4,6261	-2,0929
-32	1,6742	-4,3896	-4,8081	-1,2557
-31	2,3792	-4,5251	-6,2912	-0,6131
-30	2,0130	-4,9452	-6,2555	-0,7027
-29	2,4769	-4,5833	-6,9173	-0,1429
-28	2,7200	-5,0897	-7,1481	-0,6616
-27	2,8263	-5,1277	-7,2634	-0,6906
-26	3,6929	-5,0136	-7,9122	-0,7943
-25	4,0861	-4,6640	-7,2418	-1,5083
-24	4,1356	-5,6848	-6,9050	-2,9154



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGL E	MAGNET_TORQUE_RU EDA_1	MAGNET_TORQUE_RU EDA_2	MAGNET_TORQUE_RU EDA_3	MAGNET_TORQUE_ NETO
-23	3,6435	-5,1337	-7,5710	-1,2063
-22	4,5742	-5,2070	-8,6687	-1,1126
-21	5,0694	-4,8629	-7,7461	-2,1862
-20	5,5018	-3,9258	-7,8686	-1,5590
-19	6,6208	-3,7617	-8,9888	-1,3937
-18	7,0302	-4,0375	-8,2957	-2,7720
-17	6,5964	-3,3715	-9,0591	-0,9088
-16	6,6433	-3,2523	-9,0519	-0,8436
-15	7,6621	-3,1438	-8,4131	-2,3928
-14	7,1135	-2,0010	-8,6591	-0,4555
-13	8,5914	-2,2359	-8,6435	-2,1838
-12	8,0356	-1,6203	-9,0281	-0,6278
-11	9,0147	-0,7684	-7,9149	-1,8682
-10	8,0145	-0,5490	-7,1634	-1,4000
-9	8,7690	-0,0467	-7,8073	-1,0084
-8	7,6045	0,2778	-7,7818	0,4552
-7	9,0061	0,9746	-8,0231	-0,0083
-6	8,8588	1,2384	-7,4100	-0,2104
-5	8,8566	1,0211	-7,0940	-0,7415
-4	8,7048	1,4110	-6,3036	-0,9902
-3	8,1154	1,8850	-5,6752	-0,5552
-2	7,7476	1,8426	-5,9258	0,0208
-1	8,0858	2,3268	-6,3339	0,5749
0	7,2424	1,7507	-5,8038	0,3121
1	6,9481	2,3391	-5,1446	0,5356
2	6,4770	2,8869	-4,7647	1,1745
3	6,6204	3,3047	-4,8493	1,5335
4	6,3501	3,3663	-4,3013	1,3175
5	5,8358	3,2768	-3,8733	1,3143
6	5,4238	3,0313	-4,3878	1,9954
7	4,8502	3,1283	-4,1275	2,4057
8	4,4242	2,5250	-3,5833	1,6840
9	3,3142	3,1207	-2,9387	2,7452
10	3,7929	2,6086	-2,9844	1,8001
11	2,5817	2,5475	-2,8894	2,8551
12	2,9376	2,1665	-3,4430	2,6719
13	3,6748	1,3994	-2,7499	0,4745
14	1,7445	2,1764	-2,3936	2,8254
15	1,9470	1,7230	-2,1623	1,9383
16	2,6233	2,2692	-1,6358	1,2818



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGL E	MAGNET_TORQUE_RU EDA_1	MAGNET_TORQUE_RU EDA_2	MAGNET_TORQUE_RU EDA_3	MAGNET_TORQUE_ NETO
17	1,5731	0,8938	-2,1191	1,4397
18	0,9753	1,2965	-1,9378	2,2589
19	0,4233	1,5349	-2,1278	3,2394
20	0,8200	1,4206	-1,5515	2,1522
21	0,8370	1,4569	-1,6631	2,2830
22	0,0513	0,8376	-1,7500	2,5362
23	-0,5449	-0,0597	-1,6141	2,0992
24	0,3804	0,8410	-1,5138	1,9744
25	-0,1389	-0,2365	-1,9300	1,8324
26	-0,9150	0,0973	-0,8387	1,8510
27	-0,6529	0,3428	-0,9466	1,9424
28	-0,2154	-0,0954	-0,5970	0,7170
29	0,0545	0,2230	-1,6303	1,7988
30	-1,0364	-0,3550	-1,1361	1,8175
31	-0,2368	-0,4215	-1,1445	0,9598
32	0,0968	-0,4977	-0,2322	-0,3623
33	-0,6706	-0,4128	-0,8928	1,1507
34	0,2367	-0,1907	-0,1194	-0,3080
35	-0,2014	-1,1432	-0,8369	-0,1049
36	-0,1215	-1,0390	-1,3557	0,4382
37	-0,1015	-1,2051	-1,0731	-0,0305
38	-0,3963	-1,4010	-0,8934	-0,1113
39	-0,3225	-0,8483	-1,5049	0,9792
40	0,1995	-1,8549	-1,3729	-0,6816
41	0,2757	-1,8586	-1,5682	-0,5661
42	0,2418	-2,2091	-1,4404	-1,0105
43	0,6882	-2,4632	-1,8056	-1,3458
44	0,4481	-2,3505	-1,3670	-1,4317
45	0,3766	-2,9633	-2,4068	-0,9331

Tabla 8.16: Datos del modelo de 3 ruedas con $\beta = -15$ grados y $\alpha = 10$ grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.8 Simulación de modelos de 2 ejes con 3 ruedas decaladas 30 grados

8.1.8.1. Modelo con $\alpha=0$ grados y $\beta=0$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_EJE_1	MAGNET_TORQUE_EJE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
0	0,5017	1,7239	1,2222
1	-0,6177	1,4182	2,0359
2	-1,1780	3,1632	4,3412
3	-1,4585	2,2356	3,6942
4	-0,5600	1,6951	2,2551
5	0,2417	2,0225	1,7808
6	-0,9838	1,0145	1,9983
7	-2,0508	1,9819	4,0326
8	-0,3753	-0,5854	-0,2100
9	-1,7218	1,5625	3,2843
10	0,5481	1,3603	0,8122
11	0,2114	1,2159	1,0045
12	0,4941	0,7356	0,2416
13	2,7486	2,2752	-0,4735
14	0,9407	-1,5256	-2,4662
15	2,6318	1,3709	-1,2609
16	3,3823	-0,3866	-3,7689
17	2,4112	1,3470	-1,0642
18	0,3689	-0,7185	-1,0874
19	-0,2471	-1,7005	-1,4534
20	1,8557	-1,3154	-3,1710
21	3,8758	-1,4201	-5,2959
22	1,1653	-1,8268	-2,9921
23	3,4914	-0,7318	-4,2233
24	0,9213	-0,7879	-1,7092
25	2,6249	-0,9329	-3,5577
26			0,0000
27	-0,3723	-2,5071	-2,1349
28	-0,5372	-2,0916	-1,5544
29	0,3853	0,1054	-0,2799
30	2,0597	1,0216	-1,0381
31	0,4096	0,7318	0,3222
32	-0,3200	1,6186	1,9386
33	-0,9984	2,2509	3,2492
34	-0,9404	1,2929	2,2333



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_EJE_1	MAGNET_TORQUE_EJE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
35	-0,4089	1,8097	2,2186
36	-0,8307	2,6720	3,5027
37	-1,8235	2,2676	4,0911
38	-0,3159	1,8566	2,1725
39	-1,6577	-0,2629	1,3948
40	-0,6144	1,8451	2,4595
41	-0,4140	0,3827	0,7968
42	0,4732	2,7408	2,2675
43	-0,4988	-1,6729	-1,1741
44	-3,6081	-0,9139	2,6942
45	1,7925	0,3857	-1,4068
46	-0,3474	-0,2293	0,1181
47	-1,5291	0,2226	1,7517
48	-2,8251	-1,2765	1,5486
49	0,9265	-1,1740	-2,1005
50	2,3582	-0,8745	-3,2326
51	1,9723	-2,2625	-4,2348
52	2,2066	-3,2954	-5,5020
53	1,7000	-2,8194	-4,5194
54	3,4827	-0,1934	-3,6761
55	4,0134	-1,1592	-5,1726
56	4,1546	-3,2224	-7,3771
57	1,1627	-2,2167	-3,3793
58	2,0560	-4,2676	-6,3236
59	2,2537	-0,8998	-3,1535
60	2,3617	-0,7098	-3,0715
61	-0,9161	2,7011	3,6171
62	0,7902	-0,0045	-0,7947
63	-3,1669	2,2205	5,3874
64	-2,6844	0,4979	3,1822
65	-0,6598	1,8487	2,5084
66	-1,7141	-0,2786	1,4354
67	-2,6251	1,3702	3,9953
68	-3,5621	2,0656	5,6277
69	-0,9822	2,7481	3,7303
70	-0,2614	-0,0562	0,2052
71	-0,1282	2,9775	3,1058
72	-0,8679	2,7512	3,6190
73	-0,1590	-1,4201	-1,2611
74	-0,7994	0,8490	1,6484



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_EJE_1	MAGNET_TORQUE_EJE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
75	1,4650	0,7625	-0,7025
76	3,1549	-0,6977	-3,8526
77	-1,9001	-1,5885	0,3116
78	1,0092	-0,3738	-1,3830
79	0,1547	-1,0058	-1,1606
80	0,8909	0,5049	-0,3861
81	0,1700	-1,2026	-1,3726
82	1,4055	-2,8428	-4,2484
83	1,4883	-1,3233	-2,8116
84	1,3998	-2,1991	-3,5989
85	1,1731	-2,0554	-3,2285
86	1,2111	-1,1004	-2,3115
87	2,0861	-0,4883	-2,5743
88	-0,4260	-0,9153	-0,4893
89	1,1057	1,7565	0,6508
90	0,6841	0,3418	-0,3423
91	-1,2898	1,1201	2,4099

Tabla 8.17: Datos del modelo de 2 ejes con 3 ruedas decaladas 30 grados con $\alpha=0$ grados y $\beta=0$ grados

8.1.8.2. Modelo con $\alpha=10$ grados y $\beta=-15$ grados

ANGLE	MAGNET_TORQUE_EJE_1	MAGNET_TORQUE_EJE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
0	11,7828	13,1091	1,3264
1	9,9984	11,6866	1,6882
2	10,3015	11,9147	1,6132
3	8,1946	12,5137	4,3191
4	7,7920	9,5610	1,7690
5	8,4055	10,7865	2,3810
6	10,4549	7,3946	-3,0603
7	8,3180	9,4814	1,1635
8	9,2429	7,9372	-1,3057
9	8,5763	8,2426	-0,3337
10	9,3070	9,4608	0,1539
11	7,9294	9,6711	1,7417
12	10,6072	8,4164	-2,1908
13	10,9710	7,6137	-3,3574
14	10,4934	10,7079	0,2145



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_EJE_1	MAGNET_TORQUE_EJE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
15	11,7756	6,9149	-4,8607
16	11,7786	8,7902	-2,9884
17	9,8862	9,9023	0,0161
18	10,4051	7,9334	-2,4718
19	13,5039	8,1260	-5,3779
20	14,6344	11,7134	-2,9211
21	13,4673	9,7643	-3,7030
22	13,4429	10,5651	-2,8778
23	12,0300	12,2265	0,1966
24	10,5168	12,1827	1,6659
25	12,0956	12,5105	0,4149
26	12,9805	13,5396	0,5591
27	12,1602	12,6442	0,4841
28	8,9860	11,3812	2,3952
29	10,9187	13,5010	2,5823
30	9,8400	13,8593	4,0194
31	11,6905	12,0799	0,3894
32	9,1530	10,0419	0,8888
33	8,0366	11,0349	2,9982
34	7,4510	10,8359	3,3850
35	9,9892	8,6260	-1,3631
36	11,0487	11,3830	0,3343
37	11,0294	8,5747	-2,4547
38	11,3899	8,0958	-3,2941
39	10,7577	7,9312	-2,8265
40	8,8642	8,9153	0,0511
41	10,9505	8,0601	-2,8904
42	8,3501	8,1614	-0,1886
43	9,3996	7,3898	-2,0098
44	8,2639	7,9159	-0,3480
45	10,8340	9,3958	-1,4381
46	10,6433	8,0168	-2,6265
47	10,8151	8,5596	-2,2555
48	9,5196	11,4153	1,8957
49	12,7046	9,1407	-3,5639
50	12,4555	9,6370	-2,8185
51	12,0697	8,9274	-3,1422
52	12,7593	11,5157	-1,2436
53	13,9582	8,3751	-5,5831
54	13,1633	11,5981	-1,5652



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_EJE_1	MAGNET_TORQUE_EJE_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
55	12,8466	10,7731	-2,0735
56	12,7372	11,9666	-0,7706
57	14,6508	11,6264	-3,0245
58	9,8775	10,9291	1,0516
59	11,3820	8,7327	-2,6493
60	11,4698	11,5688	0,0991
61	10,9310	10,7233	-0,2077
62	9,4260	11,0042	1,5782
63	8,2736	10,9325	2,6589
64	8,6050	10,8827	2,2778
65	7,1929	10,4500	3,2570
66	9,4763	12,7553	3,2790
67	8,9804	10,4994	1,5189
68	9,9547	9,6815	-0,2732
69	8,9260	10,4233	1,4974
70	9,8037	10,1360	0,3323
71	8,6683	7,8292	-0,8391
72	8,7432	9,1440	0,4008
73	8,4616	8,6695	0,2079
74	10,0523	8,5287	-1,5236
75	10,7370	9,5895	-1,1475
76	12,2937	6,7263	-5,5675
77	11,0648	8,4585	-2,6063
78	11,1787	9,1298	-2,0490
79	9,5366	10,7293	1,1927
80	11,5410	10,6490	-0,8920
81	12,1123	11,0734	-1,0389
82	12,4858	12,3993	-0,0865
83	12,4977	13,3278	0,8302
84	14,0541	12,3318	-1,7223
85	12,4948	12,9334	0,4387
86	13,2761	11,8268	-1,4493
87	11,8129	11,4042	-0,4087
88	9,4788	13,2778	3,7990
89	11,4077	14,0204	2,6126
90	11,8215	13,3849	1,5634
91	11,5206	12,9243	1,4037

Tabla 8.18: Datos del modelo de 2 ejes con 3 ruedas decaladas 30 grados con $\alpha=10$ grados y β grados



Estudio de optimización de un engranaje magnético

8.1.9. Datos obtenidos de la simulación de modelos con diferentes números de imanes por rueda

8.1.9.1 Modelo de 3 imanes por rueda

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE(2-1)
0	6,3850	5,3042	-1,0808
1	6,2911	5,0618	-1,2293
2	5,6803	4,8538	-0,8265
3	6,4659	5,8148	-0,6511
4	5,9663	5,8991	-0,0672
5	5,1992	5,7038	0,5046
6	6,0765	5,4705	-0,6060
7	5,6723	4,3170	-1,3553
8	5,7910	6,1393	0,3484
9	5,5757	6,2011	0,6254
10	6,3861	5,5823	-0,8038
11	4,6340	3,9870	-0,6471
12	5,8434	4,2595	-1,5838
13	5,6616	5,0962	-0,5654
14	5,5450	3,0614	-2,4836
15	4,7472	4,2034	-0,5438
16	4,5696	5,2192	0,6497
17	5,6012	2,3401	-3,2611
18	6,2278	3,3007	-2,9271
19	4,1574	3,6487	-0,5087
20	4,2653	3,4948	-0,7705
21	5,0548	2,9825	-2,0722
22	4,9676	2,3933	-2,5743
23	3,4474	2,7011	-0,7463
24	4,0492	2,3650	-1,6843
25	2,9543	1,5855	-1,3688
26	2,6164	2,0602	-0,5562
27	3,3757	0,9689	-2,4068
28	3,4262	2,6586	-0,7676
29	2,5310	1,5811	-0,9499
30	1,4125	0,2028	-1,2097
31	0,9064	1,6796	0,7732
32	1,9049	-0,5207	-2,4256
33	1,4749	1,4079	-0,0670
34	1,1871	0,4455	-0,7416



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE(2-1)
35	1,6942	0,5002	-1,1940
36	0,9926	0,1614	-0,8313
37	1,7041	0,1895	-1,5145
38	2,0169	-0,0689	-2,0858
39	1,2985	-0,0440	-1,3425
40	1,0143	-0,6442	-1,6586
41	1,4892	0,1127	-1,3765
42	0,9084	-0,5478	-1,4562
43	0,7802	-0,6591	-1,4393
44	1,1578	-0,9775	-2,1353
45	1,0366	-0,2838	-1,3204
46	1,8280	-0,9934	-2,8214
47	0,7735	-1,5375	-2,3111
48	-0,4450	-0,2347	0,2103
49	0,8527	0,1722	-0,6805
50	0,3530	0,1287	-0,2243
51	1,4683	0,6488	-0,8195
52	1,0364	-0,0315	-1,0679
53	0,3370	1,1133	0,7763
54	0,6332	0,9655	0,3323
55	0,8836	-0,2648	-1,1484
56	-0,0139	-0,0892	-0,0753
57	-0,1165	1,5750	1,6915
58	0,2031	0,7033	0,5002
59	0,6829	-0,5173	-1,2001
60	-0,1915	0,1238	0,3153
61	0,2237	0,8076	0,5839
62	-0,4733	1,1913	1,6645
63	-0,5418	0,3052	0,8470
64	-1,0482	0,2682	1,3165
65	-1,4836	-0,5188	0,9648
66	-0,5459	0,4738	1,0196
67	-0,8970	0,3706	1,2676
68	-0,4675	1,1031	1,5706
69	-0,7228	0,2731	0,9959
70	-0,9467	0,5216	1,4684
71	-1,5558	0,9406	2,4964
72	0,0291	0,9900	0,9608
73	-0,1560	0,4778	0,6339
74	-0,0907	1,0665	1,1572



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE(2-1)
75	0,7871	1,5446	0,7575
76	-1,0266	0,4500	1,4767
77	-1,2225	1,0055	2,2281
78	-0,8684	0,5299	1,3983
79	-0,3104	-0,0276	0,2828
80	-0,9423	0,7745	1,7169
81	0,2648	0,3235	0,0587
82	-0,1928	0,2792	0,4719
83	-1,8103	0,8682	2,6785
84	-0,7298	0,4761	1,2059
85	-0,5534	0,6712	1,2246
86	-1,3144	1,3991	2,7135
87	-0,0451	1,2077	1,2528
88	-0,2345	2,1815	2,4160
89	-0,5083	2,1646	2,6730
90	-0,5531	0,7148	1,2679
91	-0,8754	1,9156	2,7910
92	-0,2486	1,5223	1,7710
93	0,0412	1,6568	1,6157
94	-0,1329	2,5815	2,7144
95	-0,0187	1,7467	1,7654
96	1,3198	2,0959	0,7761
97	-0,5130	2,6674	3,1804
98	0,5593	3,3683	2,8090
99	1,1281	1,5174	0,3893
100	1,6998	3,8325	2,1327
101	0,8368	3,1109	2,2741
102	0,9301	2,8877	1,9576
103	0,8390	3,3045	2,4655
104	1,4093	2,9505	1,5412
105	2,2290	3,8745	1,6456
106	2,0317	3,9057	1,8740
107	1,9416	4,5871	2,6454
108	2,5451	4,0611	1,5160
109	2,2515	4,0032	1,7517
110	2,3311	5,2374	2,9063
111	3,5534	5,4727	1,9193
112	3,9568	4,0991	0,1423
113	4,1924	4,9061	0,7137
114	4,3807	5,0206	0,6399



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE(2-1)
115	4,6028	4,4979	-0,1049
116	4,3789	5,4579	1,0789
117	5,0100	6,2635	1,2536
118	5,0060	6,0638	1,0578
119	6,3165	6,7560	0,4395
120	6,1369	5,9570	-0,1799

Tabla 8.19: Datos del modelo de 2 ruedas de 3 imanes por rueda

8.1.9.2. Modelo de 4 imanes por rueda

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
0	4,6683	4,8983	0,2301
1	4,7546	6,5226	1,7680
2	4,6639	4,9741	0,3103
3	4,5821	4,3398	-0,2423
4	5,2478	6,0606	0,8128
5	4,7886	5,8620	1,0735
6	3,9204	4,8595	0,9391
7	4,1636	4,8620	0,6984
8	3,8317	4,2398	0,4080
9	2,4393	4,3002	1,8609
10	2,8006	4,5707	1,7701
11	2,5258	4,6534	2,1276
12	2,9818	4,2049	1,2231
13	4,0210	2,9684	-1,0526
14	2,3030	3,0124	0,7093
15	4,5747	2,2705	-2,3042
16	2,5370	2,5408	0,0037
17	2,0252	2,0916	0,0664
18	1,5841	2,5432	0,9591
19	1,4113	2,0458	0,6345
20	0,7127	1,5164	0,8037
21	2,0101	1,9501	-0,0599
22	0,8901	3,0401	2,1500
23	0,6278	1,3188	0,6910
24	1,4687	1,7285	0,2598
25	1,2996	2,2704	0,9708



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
26	0,5413	0,9835	0,4423
27	0,3159	1,5833	1,2674
28	0,0130	0,8792	0,8662
29	1,4356	1,5487	0,1132
30	0,6969	1,2623	0,5653
31	-0,1421	0,1943	0,3364
32	0,7961	0,9750	0,1789
33	0,0450	1,1234	1,0784
34	0,5641	0,2780	-0,2861
35	0,5629	0,3236	-0,2393
36	-0,5535	0,5527	1,1063
37	0,8103	-1,1304	-1,9407
38	0,2921	-0,1534	-0,4455
39	-0,0545	-0,2797	-0,2252
40	0,9188	1,1403	0,2215
41	0,1563	0,5111	0,3547
42	0,3645	0,6933	0,3288
43	0,6410	0,4819	-0,1591
44	2,0676	-0,7694	-2,8370
45	1,5894	0,1909	-1,3985
46	-0,2194	0,7271	0,9465
47	0,7524	1,4854	0,7330
48	1,7294	-0,2313	-1,9607
49	1,0252	1,1400	0,1148
50	1,3696	-0,1963	-1,5660
51	1,4526	0,3975	-1,0551
52	-0,0783	1,6726	1,7508
53	1,3210	0,2380	-1,0830
54	1,2315	0,1544	-1,0771
55	0,7352	0,4066	-0,3286
56	1,0797	1,3156	0,2358
57	0,6849	0,8219	0,1370
58	1,3554	1,6277	0,2723
59	1,8190	0,7779	-1,0411
60	1,5380	1,2542	-0,2838
61	2,2344	2,5283	0,2939
62	1,7193	1,4572	-0,2621
63	2,5886	2,7968	0,2082
64	2,6734	2,0698	-0,6036
65	2,6236	2,8028	0,1792



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
66	2,0744	3,6478	1,5734
67	3,5315	2,9189	-0,6126
68	3,4099	3,0324	-0,3776
69	4,1412	4,1021	-0,0391
70	4,3542	3,7290	-0,6253
71	4,6876	3,3908	-1,2967
72	5,2492	3,7016	-1,5476
73	4,6704	4,4487	-0,2216
74	5,0507	4,4663	-0,5844
75	5,4001	4,7414	-0,6587
76	4,8910	5,8180	0,9270
77	5,4796	4,9153	-0,5643
78	5,9731	5,7841	-0,1889
79	5,8447	5,1030	-0,7417
80	5,6184	6,0993	0,4809
81	5,5555	6,8485	1,2930
82	4,6313	6,4767	1,8454
83	6,1905	5,2512	-0,9393
84	5,6264	7,1819	1,5554
85	7,1404	6,5212	-0,6192
86	6,3509	7,4643	1,1134
87	6,9457	6,6713	-0,2744
88	5,7037	7,0575	1,3538
89	5,2819	7,1837	1,9017
90	5,7269	5,8671	0,1402

Tabla 8.20: Datos del modelo de 2 ruedas de 4 imanes por rueda

5.1.9. 3 Modelo de 5 imanes por rueda

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
0	5,4247	5,7586	0,3339
1	6,6088	5,0219	-1,5869
2	4,1815	4,0243	-0,1572
3	4,8469	4,9546	0,1077
4	5,0703	4,8453	-0,2250
5	4,2883	5,9804	1,6921
6	5,8958	4,4319	-1,4639



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
7	5,2254	5,6983	0,4729
8	4,3713	4,0552	-0,3161
9	4,8092	4,2003	-0,6089
10	3,2935	4,2037	0,9102
11	2,5268	4,3015	1,7747
12	4,1611	2,9753	-1,1858
13	2,7474	3,1345	0,3871
14	3,3676	2,6458	-0,7218
15	3,0002	2,9582	-0,0420
16	2,1622	2,2258	0,0636
17	2,1337	3,2086	1,0748
18	1,6866	1,7502	0,0636
19	3,0223	2,3019	-0,7205
20	1,8031	1,6884	-0,1147
21	1,4984	2,4236	0,9252
22	0,3744	1,4191	1,0447
23	1,6903	1,9196	0,2293
24	1,3580	1,8660	0,5080
25	2,4820	1,6645	-0,8174
26	1,5307	2,1395	0,6088
27	-0,0465	1,6923	1,7388
28	1,1306	0,4577	-0,6729
29	0,2842	1,4427	1,1585
30	0,9156	0,5379	-0,3777
31	0,9929	0,0969	-0,8960
32	1,1225	0,9775	-0,1450
33	1,4192	1,4247	0,0054
34	1,6725	0,8018	-0,8707
35	1,5955	2,2142	0,6187
36	2,1940	0,4698	-1,7241
37	0,8918	2,3108	1,4190
38	2,3175	1,4230	-0,8945
39	1,0763	1,4021	0,3258
40	1,7219	-0,5619	-2,2839
41	1,8140	2,0679	0,2539
42	2,2012	1,4443	-0,7569
43	2,8198	2,2062	-0,6136
44	2,2733	3,0877	0,8145
45	1,8179	2,0991	0,2812
46	3,2163	2,4552	-0,7611



Estudio de optimización de un engranaje magnético

ANGLE	MAGNET_TORQUE_RUEDA_1	MAGNET_TORQUE_RUEDA_2	MAGNET_TORQUE_(2-1)
47	3,2610	2,5334	-0,7276
48	3,6770	2,4363	-1,2407
49	2,5681	2,7903	0,2221
50	4,8172	2,4536	-2,3636
51	3,2915	4,5083	1,2168
52	3,8420	4,3280	0,4860
53	5,0147	3,0922	-1,9225
54	4,4449	4,4012	-0,0437
55	4,5507	4,0512	-0,4995
56	4,9038	3,8594	-1,0444
57	5,6796	4,3878	-1,2917
58	6,5502	4,1989	-2,3513
59	5,4665	5,0564	-0,4101
60	5,1998	6,2511	1,0513
61	6,2135	5,6607	-0,5528
62	5,8822	5,6378	-0,2444
63	6,7024	4,3903	-2,3122
64	6,9603	4,7976	-2,1627
65	4,9361	5,8699	0,9339
66	5,1279	6,1275	0,9996
67	6,8530	5,2861	-1,5669
68	6,0851	6,4745	0,3894
69	6,1543	6,0547	-0,0997
70	5,7087	5,7149	0,0062
71	6,0098	7,1045	1,0947
72	5,2300	5,1366	-0,0934

Tabla 8.21: Datos del modelo de 2 ruedas de 5 imanes por rueda



8.2. Planos

Contiene los planos utilizados para una posible construcción del modelo en este documento presentado.

8.2.1. Plano del imán de NdFeB de 80x20 mm.

8.2.2. Plano del eje de 2 ruedas

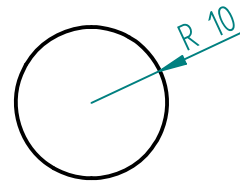
8.2.3. Plano del eje de 3 ruedas

8.3.4. Soporte de 3 imanes

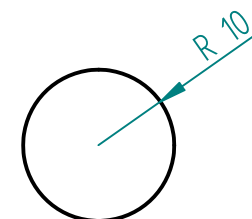
8.3.5. Soporte de 4 imanes

8.2.6. Soporte de 5 imanes

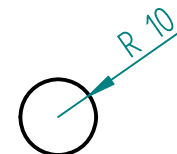
8.2.7. Soporte para imanes NdFeB



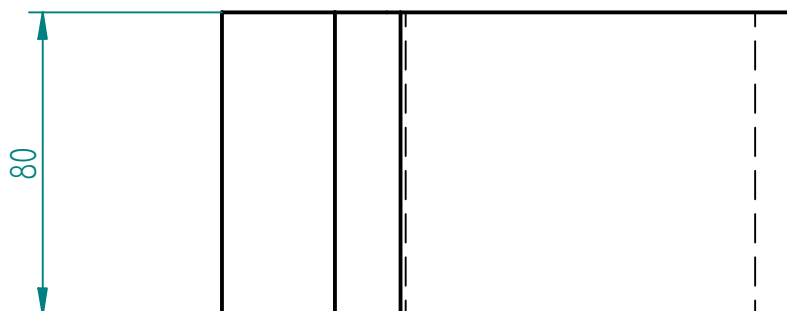
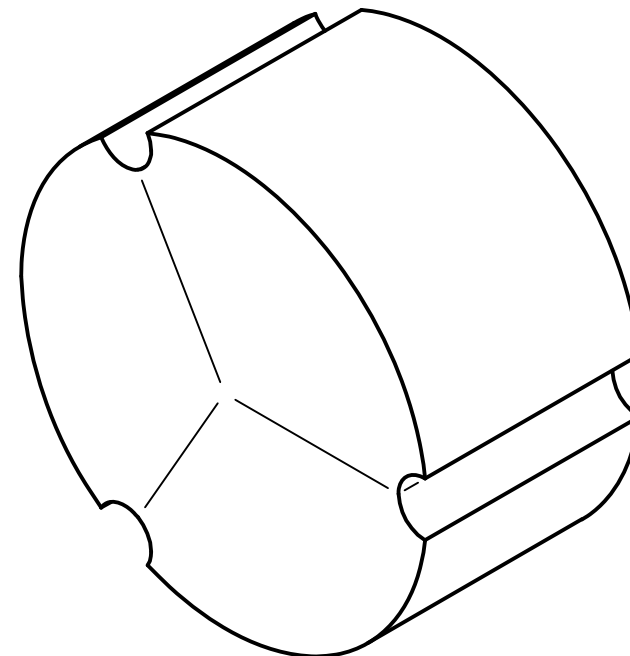
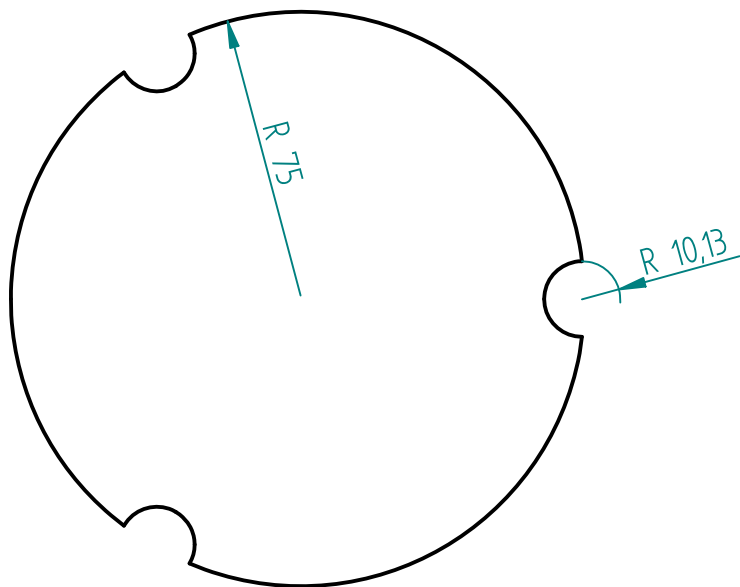
	Nombre	Fecha		Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior	
Dibujado	Juan Carlos	6/04/10			
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Título Estudio de optimización de un engranaje magnético		
			A4	Plano Iman de NdFeB de 80x20	Rev
			Archivo:		
			Escala 1:1	Peso	Hoja 1 de 2



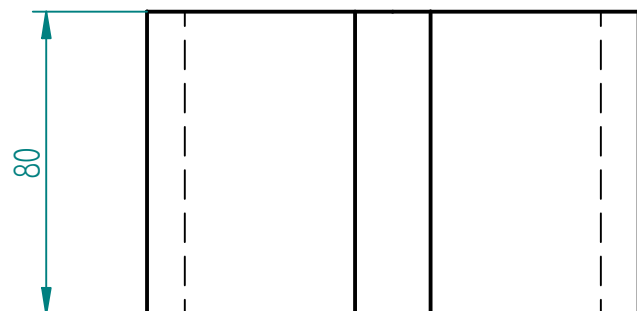
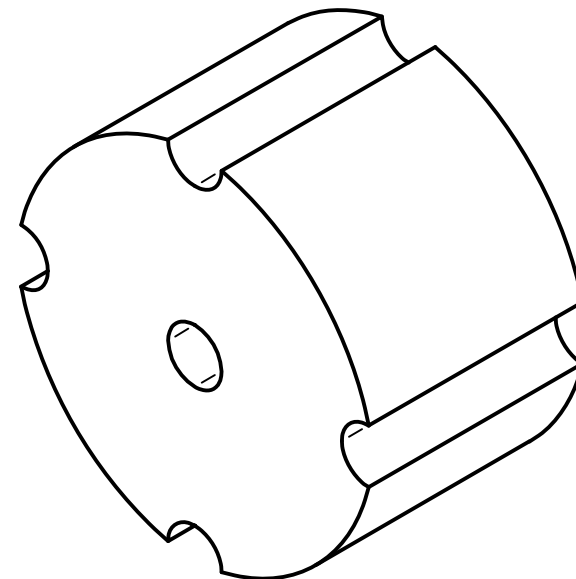
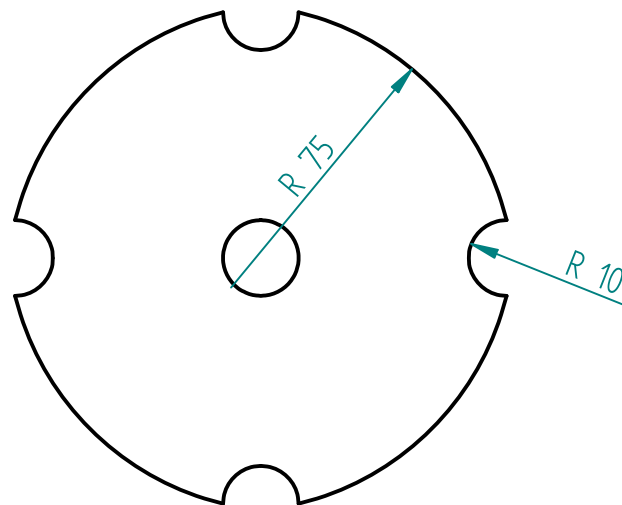
	Nombre	Fecha		Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior	
Dibujado	Juan Carlos	12/04/10			
Comprobado					
Aprobado I					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1º			Título Estudio de optimización de un engranaje magnético		
			A4	Plano Eje 2 ruedas	Rev
			Archivo:		
			Escala 1:1	Peso	Hoja 1 de 2



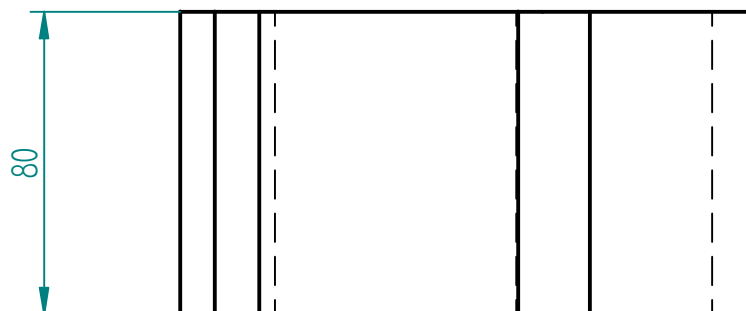
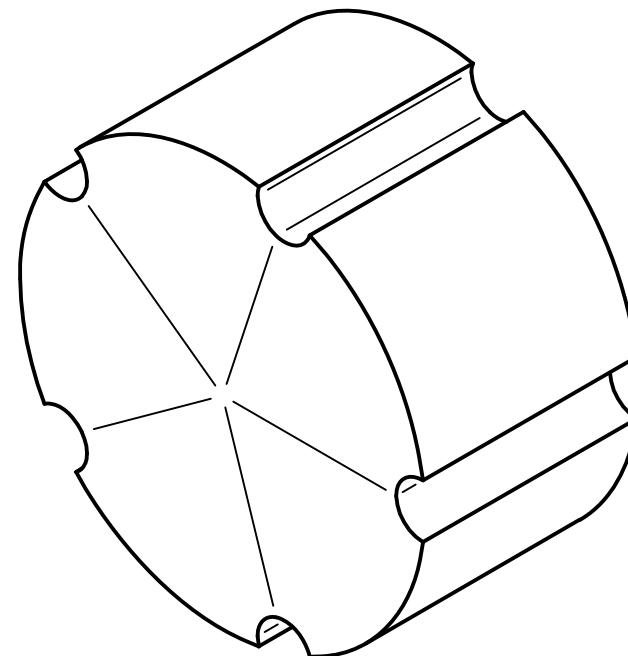
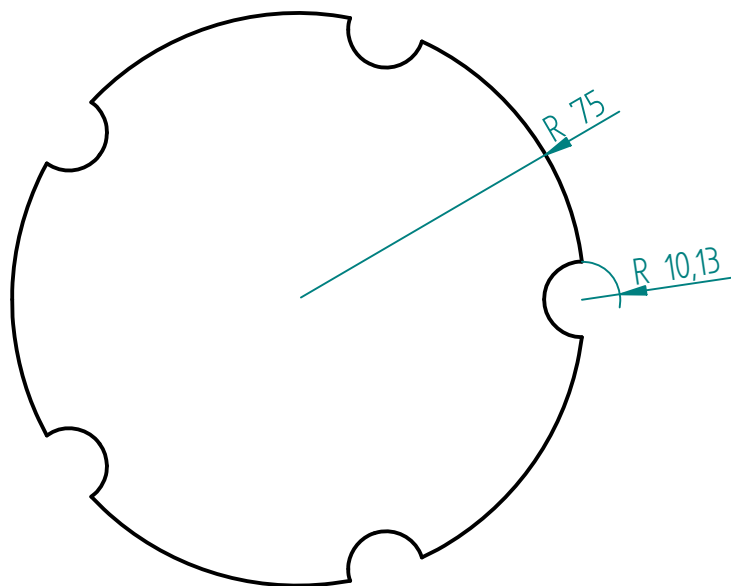
	Nombre	Fecha		Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior	
Dibujado	Juan Carlos	6/04/10			
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Título Estudio de optimización de un engranaje magnético		
			A4	Plano Eje de 3 ruedas	Rev
			Archivo: eje_largo.dft		
			Escala 1:2	Peso	Hoja 1 de 2



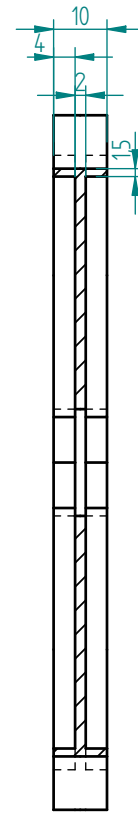
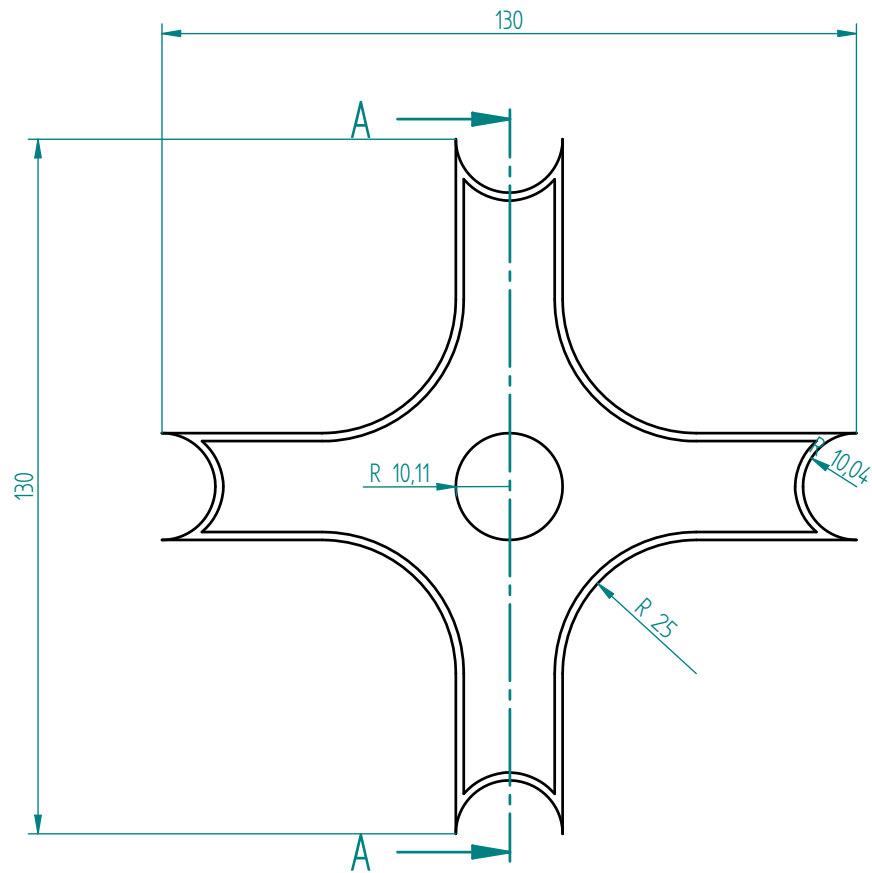
	Nombre	Fecha	 Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior
Dibujado	Juan Carlos	12/04/10	
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2			Título Estudio de optimización de un engranaje magnético
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4 Plano Soporte de 3 imanes Rev
			Archivo:
			Escala 1:2 Peso Hoja 1 de 2



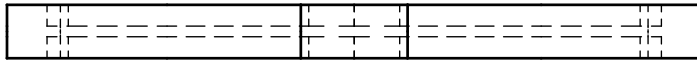
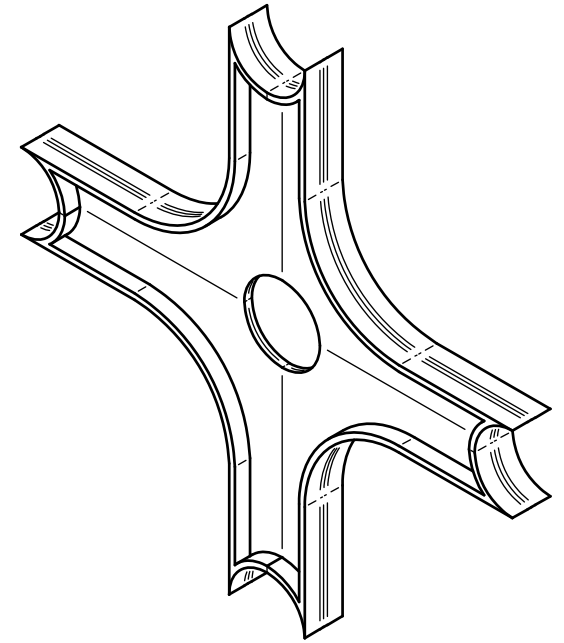
	Nombre	Fecha		Universidad Carlos III de Madrid	
Dibujado	Juan Carlos	12/04/10		Escuela Politécnica Superior	
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Título Estudio de optimización de un engranaje magnético		
			A4	Plano Soporte 4 ruedas	Rev
			Archivo:		
			Escala 1:2	Peso	Hoja 1 de 2



	Nombre	Fecha	 <div>Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior</div>		
Dibujado	Juan Carlos	12/04/10			
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Título Estudio de optimización de un engranaje magnético		
			A4	Plano Soporte de 5 imanes	Rev
			Archivo:		
			Escala 1:2	Peso	Hoja 1 de 2



CORTE A-A



	Nombre	Fecha		Universidad Carlos III de Madrid				
Dibujado	Juan Carlos	11/04/10		Escuela Politécnica superior				
Comprobado				Título				
Aprobado 1								
Aprobado 2			Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$					
						A3	Plano	Rev
						Soporte para iman NdFe		
			Archivo: soporte_aspa.dft					
			Escala	1:1	Peso	Hoja 1 de 1		